N° D'ORDRE
741

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Jacques FURET

PREMIÈRE THÈSE :

Sécurité dans le contrôle des piles atomiques

DEUXIÈME THÈSE :

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 3 Avril 1962 devant la Commission d'Examen

MM. F. PERRIN — Président
P. GRIVET — Examinateurs
A. BLAQUIERE — Examinateurs

Nº D'ORDRE
741

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Jacques FURET

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

PREMIÈRE THÈSE :

Sécurité dans le contrôle des piles atomiques

DEUXIÈME THÈSE :

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 3 Avril 1962 devant la Commission d'Examen

MM. F. PERRIN — Président
P. GRIVET, A. BLAQUIERE — Examinateurs

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41538121_0017

FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE PARIS

- P R O F E S S E U R S -

Doyen..... M. ZAMANSKY .

G. JULIA	T Analyse supérieure et Algèbre Supérieure
DE BROGLIE	T Théories physiques
PRENANT	T Anatomie et Histologie comparées
GRASSE	T Evolution des êtres organisés
PREVOST	T Chimie organique
CHAUDRON	T Chimie appliquée
WYART	T Minéralogie et Crital.
TEISSIER	T Zoologie
MANGENOT	T Biologie Vég. (Orsay)
AUGER	T Physique quantique et Relativité
MONNIER	T Physiologie Générale
PIVETEAU	T Paléontologie
ROCARD	T Physique (E.N.S.)
CARTAN	T Mathématiques(E.N.S.)
LAFFITTE	T Chimie générale
FAVARD	T Géométrie supérieure
COULOMB	T Physique du Globe
Mle COUSIN	T Biologie Animale (SPCN)
CHRETIEN	T Chimie minérale
DRACH	T Zoologie
KASTLER	T Physique (E.N.S.)
EPHRUSSI	T Génétique
RIVIERE	T Géologie SPCN et sédim.
GAUTHERET	T Biologie Vég. (P.C.B.)
LUCAS R.	T Recherches Physiques
THOMAS A.	T Biologie cellulaire
ARNULF	T Optique appliquée
MORAND	T Physique Enseignement
SOLEILLET	T Physique (P.C.B.)
FORTIER	T Mécanique exp. des Fluides
DANJON	T Astronomie
PETIT	T Biologie maritime
QUENEY	T Météorologie et dynamique atmosphérique
GALLIEN	T Embryologie
EICHHORN	T Botanique
DE CUGNAC	T Biologie Végétale (SPCN)
Mle CAUCHOIS	T Chimie Physique
THELLIER	T Physique du Globe
L'HERITIER	T Biologie Générale (Orsay)
GRIVET	T Radioélectricité (Orsay)
PONCIN	T Mécanique Générale
DUBREIL	T Arithmétique et théorie des nombres
QUELET	T Chimie Organique
CAGNIARD	T Géophysique appliquée
CHAMPETIER	T Chimie macromoléculaire
CUVILLIER	T Micropaléontologie
JUNG	T Pétrographie
TRILLAT	T Microscopie et diffraction électronique
WIEMANN	T Chimie organique et struc.
JACQUINOT	T Spectroscopie et physique céleste (Orsay)
VASSY	T Physique de l'atmosphère
DESTOUCHES	T Théories Physiques
AMIEL T	T Chimie générale
HOCART	T Minéralogie et Cristallog.
J.P. MATHIEU	T Physique (Optique)
COUTEAUX	T Biologie animale (P.C.B.)
MAY	T Zoologie (Orsay)
CHOQUET	T Théorie des fonctions et Topologie
FELDMANN	T Biologie Végétale marine
GUINIER	T Physique des solides (Orsay)
JOST	T Physiologie comparée
FORTET	T Calcul des Probabilités et Physique mathématique
SCHWARTZ	T Calcul diff. et Intégral
CHOUARD	T Physiologie Végétale
MALAVARD	T Aviation (Techn. Aéronaut.)
BRELOT	T Calcul diff. et intégral
NORMANT	T Synthèse organique générale
BENARD	T Chimie Minérale
BUVAT	T Botanique(E.N.S.)
DUGUE	T Statistiques Mathématiques
SOULAIRAC	T Psychophysiologie
ULRICH	T Physiologie Végétale
MARECHAL	T Optique théorique et appl.
KIRRMANN	T Théories Chimiques
CHADEFAUD	T Botanique
Mle LE BRETON	T Physiologie de la nutrition
SALEM	T Mathématiques générales
LELONG	T Applic. de l'analyse à la géométrie
DEVILLERS	T Anatomie et Histologie comp.
EHRESMANN	T Topologie Algébrique
FRANÇON	T Physique (S.P.C.N.)
GLANGEAUD	T Géographie phys. et Géologie dynamique
GODEMENT	T Mathématique (M.P.C.)
PISOT	T Tech. Mathém. de la Phys.
ROCH	T Géologie
SCHATZMAN	T Astrophysique
TERMIER	T Paléontologie stratig.
ZAMANSKY	T Mathématiques générales
LENNUIER	T Physique (M.G.P.)
RIZET	T Génétique (Orsay)
ROUTHIER	T Géologie appliquée
Mme TONNELAT	T Physique Théorique
DIXMIER	T Mathématiques (M.P.C.)
SOUCHAY	T Chimie générale
AIGRAIN	T Electrotechnique géné.
BRUSSET	T Chimie systématique
M. LEVY	T Physique théorique des hautes énergies (Orsay)
Mme CHAIX	T Chimie biologique
Mme HUREL-PY	Biologie Végétale (PCB)
PIAUX	T Chimie (M.P.C.)
BRUN	T Mécan. théorique des Fluides
LEDERER	T Chimie biologique
Mme DUBREIL	T Mathém. (Agrégation)
Mme LELONG	T Mathématiques (E.N.S.)
BELLAIR	T Géologie (S.P.C.N.)

COTTE	T	Physique électricité
DUBOIS J.E	T	Chimie organique
LAMOTTE	T	Zoologie (E.N.S.)
MICHEL A.	T	Chimie Minérale (Orsay)
OLMER	T	Energétique générale
ROUAULT	T	Electricité (Orsay)
GAUTHIER	T	Mécanique appliquée
BARCHEWITZ	T	Chimie Physique
BROSSEL	T	Physique atomique
BUSER	T	Physiologie comparée
CAMUS	T	Physiologie Vég. BMPV
CASTAING	T	Physique (Orsay)
CURIEN	T	Minéralo. et Cristallog.
MOYSE	T	Physiologie Vég. (Orsay)
NOIROT	T	Evolution des Etres Org.
PANNETIER	T	Chimie générale (Orsay)
POSSOMPES	T	Zoologie
PULLMANN	T	Chimie théorique
TEILLAC	T	Physique Nucl. et Radioactiv.
TONNELAT	T	Biologie Physico - chimique
VILLE	T	Econométrie
WILLEMART	T	Chimie (P.C.B.)
DODE	T	Chimie (Orsay)
FREYMANN	T	Recherches Physiques
GUINOCHET	T	Biol. Vég. SPCN (Orsay)
ROLLET	T	Chimie (P.C.B.)
Melle JOSIEN	T	Chimie S.P.C.N.
CHEVALLEY	T	Géométrie algébrique et théorie des groupes.
ARNOULT	T	Electronique (Orsay)
CHAPELLE	T	Physique (Orsay)
DELANGE	T	Mathématiques (Orsay)
DENY	T	Mathématiques Géné. (Orsay)
GERMAIN	T	Mécan. théor. des fluides
LUCAS G.	T	Géologie
ALLARD	T	Chimie Physique
BERTHELOT	T	Phys. Fondamentale des Hautes Energies (Orsay)
BRICART	T	Météorologie et phys. de l'Atmosphère.
Mme ALBE - FESSARD	T	Psychophysiologie
FRIEDEL	T	Physique des Solides (Orsay)
M. JULIA		Etudes des Molécules naturelles complexes.
LENDER	T	Biol. Animale (SPCN) Orsay
MAGAT	T	Physico-chimie des radio-éléments
Melle QUINTIN	T	Electrochimie
MONOD	T	Chimie du Métabolisme
BENOIT	T	Physiol. Animale (Orsay)
DE POSSEL	T	Analyse numérique
CHARLOT	T	Chimie analytique
HAISSINSKY	T	Radiochimie
LEMEE	T	Physiol. Vég. BMPV (Orsay)
GUERIN	T	Chimie M.P.C. (Orsay)
CHATELET M.	T	Chimie (P.C.B.)
JEAN	T	Physique Nucléaire (Orsay)
MATTLER	T	Physique S.P.C.N.
MICHEL L.	T	Phys. Théor. des Hautes Energies (Orsay)
BERGERARD	T	Zoologie (Orsay)
BERTEIN	T	Electronique (Orsay)
BOUISSIERES	T	Chimie des Radioéléments (Orsay)
Mme COUTURE	T	Thermodynamique et Méc. Physique.
ELLENBERGER	T	Géologie appli. s/ le terr.
FRANC		Biol. Animale (P.C.B.)
SCHNELL		Botanique tropicale (Orsay)
STOLKOWSKI		Physiologie générale
ACHER		Chimie Biol. (Orsay)
BAUDOIN		Biologie animale P.C.B.
BEAUMONT		Biologie animale S.P.C.N.
BLAMONT	T	Géophysique Ionosphère
BOURREAU		Botanique
CURIE D.		Physique (M.G.P.)
DURAND - DELGA		Géologie
FREON	T	Chimie organique (Orsay)
HELLER	T	Physiologie végétale
TORTRAT	T	Calcul des Probabilités
CAILLEUX		Géologie (S.P.C.N.)
MAGNAN	T	Physique (S.P.C.N.)
DAUDEL	T	Mécanique ondulatoire appli. à la Chimie Théorique et à la Physique Nucléaire.
Melle FOURCROY		Biol. Végétale (S.P.C.N.)
Mme CHOQUET-BRUHAT	T	Méc. Analytique et Mec céleste.
Melle VEIL		Physiologie Générale
LWOFF	T	Microbiologie
SIESTRUNCK	T	Mécan. Phys. et Expérimentale
LACOMBE	T	Métallur. des métaux Nucléaires
BROCHARD	T	Physique P.C.B. (Orsay)
CABANNES	T	Mécanique générale
LESIEUR	T	Mathématiques M.P.C. (Orsay)
MAZET	T	Mécanique générale (Orsay)
CAIRE		Géographie physique et Géol. Dynamique.
COMOLET	T	Mécanique des Fluides
CORABOEUF		Physiologie Animale
DELLOUE		Physique des l'Exosphère
GORENFLOT		Botanique II (Orsay)
HOUILLON		Biologie Animale P.C.B.
JULLIEN J		Chimie P.C.B.
MALGRANGE	T	Tech. Math. de la Phys.
OLIVIER		Antropologie
NOZERAN	T	Botanique II (Orsay)
BLANC - LAPIERRE		Physique ENS (Orsay)
CHEVAUGEON	T	Botanique (Orsay)
KAHANE	T	Mathématiques (Orsay)
SAMUEL	T	Mathématiques ENS féminines
KOURGANOFF	T	Astronomie (Orsay)
THIRY	T	Mécanique céleste

SECRETAIRE GENERAL ..... R. POULLAIN

S O M M A I R E

Nous avons abordé le problème de la sécurité dans le contrôle des piles atomiques à la suite de notre participation d'une part aux avant-projets de piles atomiques du C.E.A. et d'autre part à l'examen au sein de la sous-commission de sûreté des piles, de la sécurité des piles du C.E.A. en fonctionnement ou en projet.

Nous avons été emmenés à nous intéresser alors aux risques encourus par les piles pendant leur fonctionnement et par la même à leur comportement en régime dynamique.

Ce travail traite principalement de l'importance des sécurités intrinsèques, de l'influence des variations de réactivité sur les évolutions de puissance en régime d'accident et du développement d'appareillages de sécurité robustes et de fonctionnement très sûr.

L'accident de démarrage a été particulièrement développé aussi bien pour les piles à bas flux où un compromis est à faire entre la vitesse de réponse des dispositifs de sécurité et les fluctuations statistiques, que pour les piles à haut flux ou l'empoisonnement xénon intervient du coté limite inférieure de la vitesse de libération de réactivité.

L'intérêt du développement de l'automatisme dans le contrôle des piles atomiques comme facteur de sécurité a été souligné.

Les détails nécessaires à la compréhension de tous les schémas des appareils mis au point sont donnés.

AVANT - PROPOS

Ce travail a été effectué au DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE.

Je désire exprimer ma très vive reconnaissance à Monsieur le HAUT COMMISSAIRE, F.PERRIN et à Monsieur M.SURDIN, CHEF du DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE qui m'ont donné la possibilité de mener à bien cette étude. Je suis h eureux de pouvoir remercier Monsieur J.WEILL, CHEF de la Section Autonome d'Electronique des Réacteurs qui m'a engagé à entreprendre cette thèse, qui m'a conseillé et fait bénéficier d'enseignements très nombreux au cours de discussions extrêmement fructueuses:

Je tiens également à souligner l'importante contribution qui m'a été apportée par les Ingénieurs et les Agents Techniques du COMMISSARIAT, particulièrement : Mlle BETTEMBOURG, MM. CAILLET, CHAIGNE, CHAZAL du groupe de Calcul Analogique pour les calculs (sur machines) d'évolutions de puissance en régime d'accident.

Je tiens aussi à remercier les Ingénieurs et les Agents Techniques du laboratoire qui m'ont aidés à entreprendre et à réaliser les appareillages nécessaires. M. QUENEE pour l'amplificateur à courant continu transistorisé à chopper, MM. FUAN et MELET pour l'amplificateur statique de sécurité. M. BREGANT pour le détecteur à soufflets de la barre fusible et M. LYSCAR pour les ensembles de chaînes de sécurité.

TABLE DES MATIERES

Pages

SOMMAIRE.

AVANT-PROPOS.

Chapitre I - LA SECURITE DE FONCTIONNEMENT DES PILES ATOMIQUES ET LES RISQUES ENCOURUS LORS D'INCIDENTS LIES A CE FONCTIONNEMENT.

1.1. Risques concernant le niveau des radiations et les produits de fission libérés en régime d'accident. - 12 -

1.2. Rappel des principaux accidents connus. - 19 -

1.3. Différentes causes probables d'accidents d'une pile atomique et les remèdes à appliquer pour éviter ces accidents. - 25 -

Chapitre II - ACCIDENTS PROBABLES PENDANT LE FONCTIONNEMENT DES PILES ATOMIQUES.

2.1. L'accident de démarrage. - 29 -

2.2. L'accident de réfrigération. - 30 -

Chapitre III - EVOLUTION DE LA PUISSANCE NEUTRONIQUE EN REGIME D'ACCIDENT.

3.1. Evolution sans coefficient de température. - 35 -

3.2. Evolution avec coefficient de température. - 45 -

3.3. Méthodes approchées de calcul de ces évolutions. - 50 -

3.4. Résultats de certaines expériences en vraie grandeur. 75 -

Pages

Chapitre IV - INFLUENCE DE LA VITESSE DE LIBERATION DE REACTIVITE SUR LA SECURITE DE FONCTIONNEMENT DES PILES ATOMIQUES.

4.1. Limite supérieure et limite inférieure de cette vitesse. 95

4.2. Relation entre la vitesse de libération de réactivité et le transitoire de période. 97

4.3. Vitesse de libération de réactivité et vitesse d'empoisonnement xénon. 110

Chapitre V - INFLUENCE DU RETARD DU FONCTIONNEMENT DES SECURITES SUR LES CONSEQUENCES DE L'ACCIDENT LIE A UNE LIBERATION EXCESSIVE DE REACTIVITE.

5.1. Saut brusque de réactivité. 139

5.2. Variation linéaire de réactivité. 147

Chapitre VI - ACCIDENT DE REFRIGERATION.

6.1. Accident lié au manque de réfrigération à puissance nominale. 153

6.2. Rupture du circuit primaire. 157

Chapitre VII - PHILOSOPHIE DE LA SECURITE DE FONCTIONNEMENT DES PILES ATOMIQUES.

7.1. Expériences exponentielles. 160

7.2. Piles atomiques expérimentales de faible puissance ou empilements critiques. 161

7.3. Piles atomiques expérimentales à haut flux et piles productrices d'énergie. 161

Pages

Chapitre VIII - LES CHAINES DE SECURITE.

8.1. Définition des chaînes de sécurité et des paramètres qui les caractérisent. 163

8.2. Les pannes d'appareillage, la multiplicité des éléments constituant les chaînes de sécurité, coïncidences, anticoïncidences et tests de bon fonctionnement. 169

8.3. Caractéristiques auxquelles doivent satisfaire les appareils de mesures physiques des chaînes de sécurité, performances en régime dynamique de fonctionnement. 179

8.4. Les automatismes d'interdiction et les méthodes nouvelles d'élaboration de leurs circuits. 188

8.5. Avantages de l'utilisation des éléments statiques dans les chaînes de sécurité. 192

8.5.1. L'utilisation des éléments statiques dans les amplificateurs de mesure.

8.5.2. L'utilisation des éléments statiques dans les déclencheurs ou dans les systèmes à seuil.

8.5.3. Le remplacement des relais électromécaniques par des relais statiques.

8.6. L'amplificateur linéaire de sécurité de niveau de puissance neutronique. 212

8.7. Le limiteur d'évolution de puissance neutronique. 215

8.8. Exemples de réalisation de chaînes de sécurité. 222

8.9. L'évolution des chaînes de sécurité vers les calculateurs. 233

Pages

Chapitre IX - LES DISPOSITIFS DE SECURITES RAPIDES DANS LE CAS DES BAS NIVEAUX DE FLUX NEUTRONIQUE. 236

Chapitre X - LES DISPOSITIFS DE SECURITE DU TYPE "FUSIBLE". 240

CONCLUSION 244

Chapitre I

SECURITE DE FONCTIONNEMENT DES PILES ATOMIQUES ET LES RISQUES ENCOURUS LORS D'INCIDENTS LIES A CE FONCTIONNEMENT

Nous sous-entendons ici par sécurité de fonctionnement des piles atomiques leur protection contre les dommages qu'elles peuvent subir au cours d'incidents liés à leur fonctionnement.

Nous n'envisageons pas les risques encourus par les personnes travaillant autour des piles atomiques ou se trouvant dans des zônes d'habitation à proximité de ces dernières. Il est évident néanmoins que ces risques sont en partie liés au bon fonctionnement des piles atomiques.

En général on envisage deux critères de sécurité : le critère économique et le critère humain.

Le critère économique de la sécurité est lié au prix de revient des installations, aux frais de réparation à faire en cas d'incident, aux frais d'amortissement (c'est-le cas en particulier des piles de puissance productrices d'énergie,) etc..

Le critère humain de la sécurité consiste à imposer que le nombre moyen d'accidents de personnes liés aux incidents susceptibles de se produire pendant le fonctionnement des piles atomiques soit inférieur au nombre d'accidents qui se produisent dans toutes les autres industries (chimique, minière, mécanique, etc...). La comparaison de ces deux critères qui permet de choisir le plus sévère peut être faite sur une base économique à condition d'affecter un prix à la vie humaine, prix fixé par exemple par des compagnies d'assurances. Cette comparaison a été faite par certains auteurs qui montrent alors que le critère économique est plus sévère que le critère humain.* Même si cette notion de prix de la vie humaine est très contestable, il est intéressant de souligner à la lumière des résultats de ces travaux que le critère économique et le critère humain de la sécurité sont compatibles.

* Référence [1]

1.1 - Risques concernant le niveau des radiations et les produits de fission libérés.

Le risque fondamental est l'accident grave dû à l'ampleur excessive prise par la réaction en chaîne. Il peut entraîner la rupture des gaines entourant les barreaux combustibles, la combustion de ces derniers dans le fluide qui les entoure, la dispersion alors d'oxydes empoisonnés par le plutonium et les produits de fission dans l'installation, le local - pile et même aux alentours. Ce risque est d'autant plus grave lorsque la formation des produits de fission est arrivée à saturation avant l'accident. Leur activité γ est approximativement de l'ordre de 6 curies par watt de la puissance de la pile.

Le manque d'information sur la quantité des produits toxiques libérés en cas d'accidents de ce genre est une gêne sérieuse pour déterminer les risques encourus par les personnes du point de vue irradiation et contamination.

De nombreux calculs ont été faits concernant l'évaluation des risques dans ce domaine par beaucoup d'auteurs avec différentes hypothèses. La figure 1-1 montre par exemple la décroissance après arrêt de l'activité γ d'une pile atomique à neutrons thermiques de 1000 MW et (on suppose ici que le temps de séjour des barreaux dans la pile est $\gg 10^6$ s) la courbe de la figure 1-2 indique la dose reçue, calculée par une personne en vue directe du centre d'un nuage où s'accumule 1 p.100 des produits de fission libérés à la suite d'un accident sur une pile de même puissance; ce nuage est supposé fixe dans le temps; on peut constater que la dose reçue dépasse encore 25 roentgen à 6 miles environ*.

Les courbes de la figure 1-3 calculées par MC KINLAY** indiquent

* Référence [2] ** Référence [3]

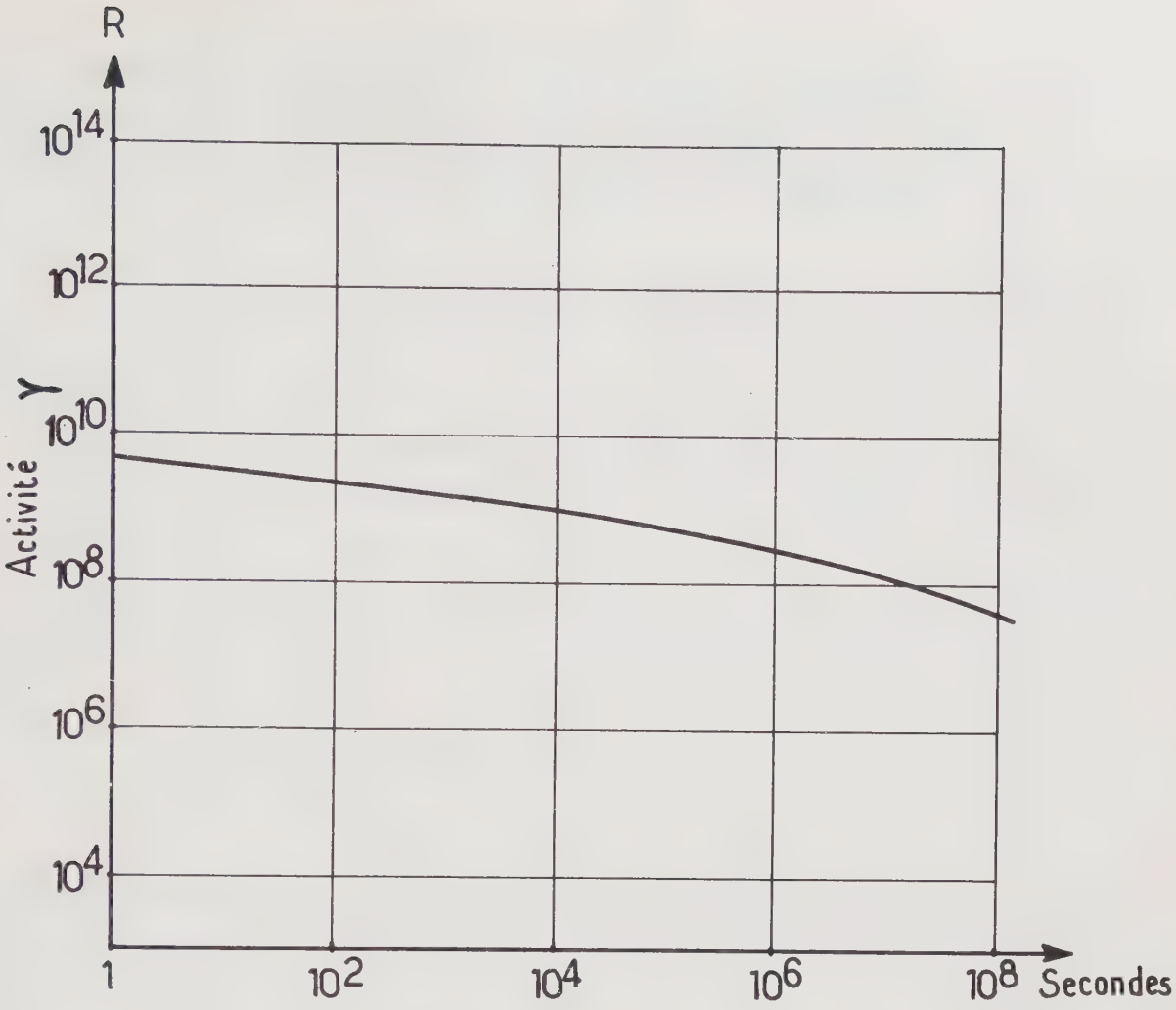

R
10^{14}
10^{12}
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
Activité Y
1
10^{2}
10^{4}
10^{6}
10^{8}
Secondes

fig.: 1-1

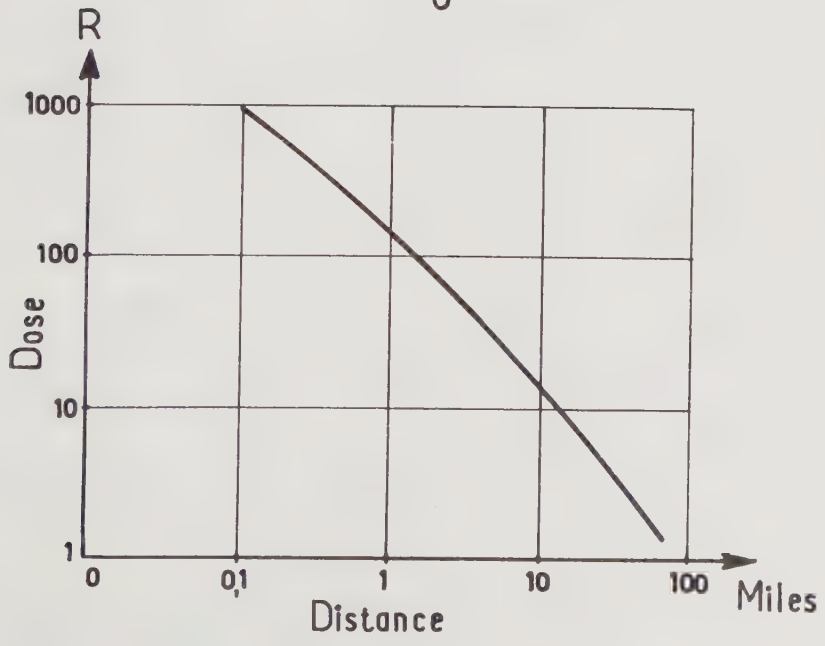

R
1000
100
10
1
Dose
0
0,1
1
10
100
Miles
Distance

fig.: 1-2

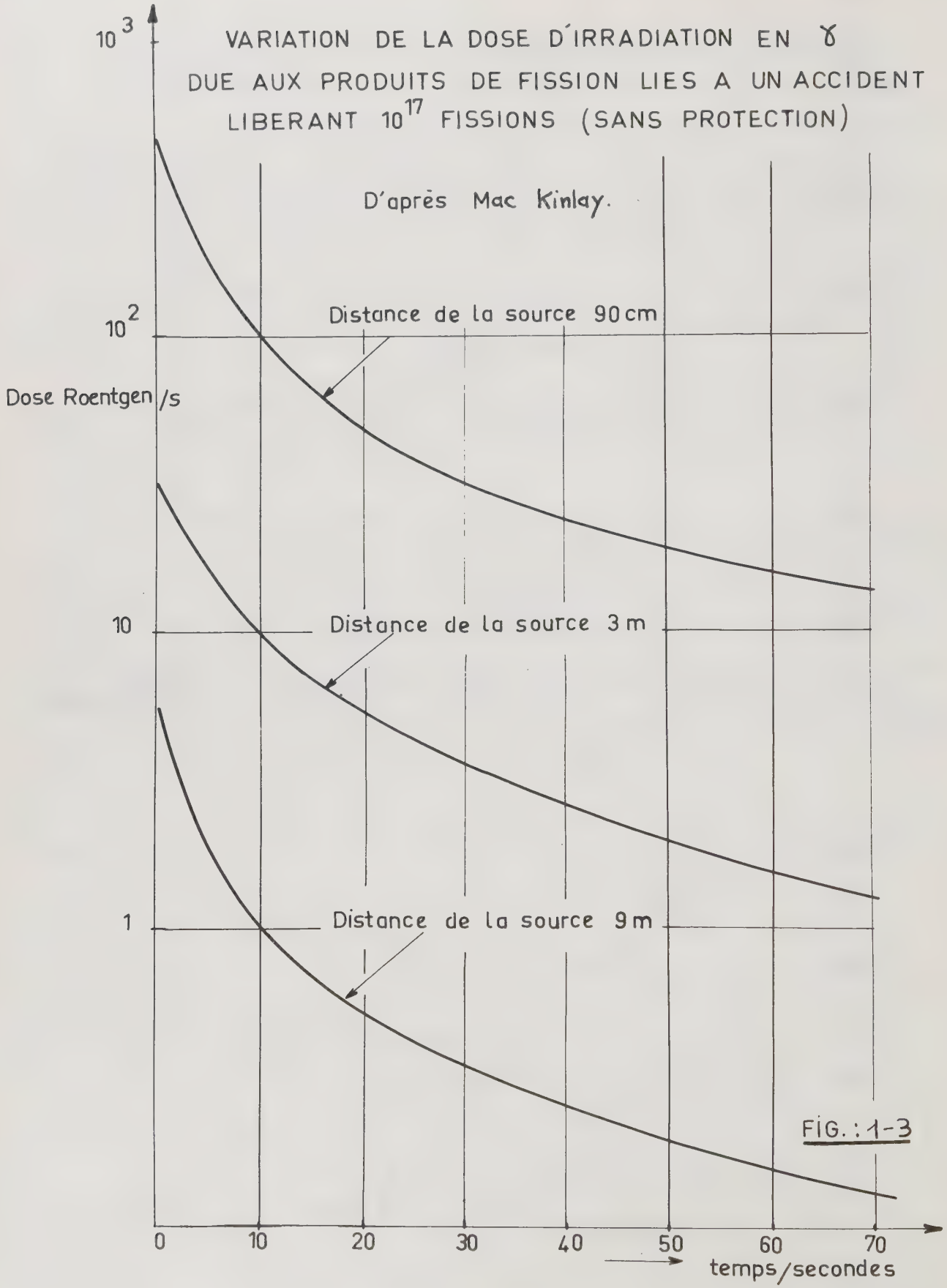

VARIATION DE LA DOSE D'IRRADIATION EN γ
DUE AUX PRODUITS DE FISSION LIES A UN ACCIDENT
LIBERANT 10^17 FISSIONS (SANS PROTECTION)
D'après Mac Kinlay.
10^3
10^2
10
1
Dose Roentgen /s
Distance de la source 90 cm
Distance de la source 3 m
Distance de la source 9 m
0
10
20
30
40
50
60
70
temps/secondes

FIG. : 1-3

la variation de la dose d'irradiation en γ due aux produits de fission liés à un accident se produisant sur une pile à uranium de puissance très faible et libérant 10^{17} fissions, la pile n'étant pas munie de protection.

Dans le tableau de la figure 1-4, on a indiqué les résultats des calculs faits par C. E. BELLERIDGE,* concernant la distance maximum permise pour la dose inhalée d'Iode en fonction d'excursions de puissance de différentes amplitudes / succédant à une marche continue à 100 W d'une pile à uranium 235. BELLERIDGE suppose ici qu'il n'y a pas confinement des produits de fission ; il englobe dans l'iode inhalée ^{135}I, ^{134}I et ^{131}I et prend pour dose permise 25 rad, ce qui correspond approximativement à la dose maximum admissible pour la thyroïde de l'enfant.

Tableau - (figure 1-4)

Distance maximum permise pour la dose (1) inhalée d'iode (2) en fonction d'excursions de puissance de différentes amplitudes et une marche continue de la pile à 100 W

Nombre de fissions	Distance de la pile
$3\ 10^{17}$	140 m
10^{18}	170 m
10^{19}	450 m
10^{20}	1 500 m

(1) dose prise égale à 25 rad pour la thyroïde de l'enfant

(2) ^{135}I - ^{133}I - ^{134}I / ^{131}I

(d'après G. E. BELLERIDGE)

* Référence [3]

Pour les piles atomiques expérimentales de faible puissance, lorsque se produisent des accidents liés à des excurcions de puissance, les irradiations sont approximativement proportionnelles aux énergies libérées.

Ces énergies sont approximativement connues et nous indiquons ci-dessous les valeurs données par NICHOLLS.

Tableau - (figure 1-5)

Energies moyennes libérées lors d'accidents liés à des excursions de puissance se produisant sur des piles atomiques de puissance nulle.

Caractéristiques de la pile	Nombre de fissions pendant le 1er pic.	Nombre de fissions total
Volume Uranium - Eau $\leqslant$ 100 litres	10^{16} - 10^{17}	10^{17} - 10^{18}
Volume Uranium - Eau $\leqslant$ 1 000 litres	10^{17} - 10^{18}	10^{18} - 10^{19}
Uranium modérateur solide	10^{17} - 10^{19}	10^{18} - 10^{20}

(d'après C. M. NICHOLLS)

On sait que dans ce genre d'accident, l'énergie libérée pendant le premier pic est de beaucoup la plus importante.

Les doses d'irradiation approximatives pour ces accidents peuvent se calculer et nous indiquons ci-dessous (figure 1-6). Les résultats obtenus par C. M. NICHOLLS dans le cas où il n'existe pas de protection radiologique autour de la pile.

Tableau - (figure 1-6)

Doses d'irradiation approximatives en fonction de la distance pour des accidents qui libèrent différentes énergies (sans protection)

Doses	Nombre de fissions			
	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}
50 p. 100 Letale ($\sim$ 500 roentgen)	4,5 m	14 m	50 m	150 m
Exposition accidentelle (25 roentgen)	20 m	65 m	225 m	750 m

(d'après C. M. NICHOLLS).

Sur la figure 1-7, on a porté les résultats des calculs faits par C. M. NICHOLLS dans le cas où l'on tient compte d'une protection en acier, pour un accident survenant à une pile de puissance nulle et qui libère 10^{18} fissions.

Tableau - (figure 1-7)

Doses d'irradiation approximatives en fonction de la distance pour un accident qui libère 10^{18} fissions (avec une protection d'acier variable)

Doses	Protection		
	2,5 cm Acier	15 cm Acier	30 cm Acier
50 p. 100 **Létale**	4 m	2,7 m	1,8 m
25 roentgen (Exposition accidentelle)	18 m	12 m	8 m
12 roentgen (exposition d'intervention)	26 m	18 m	11 m

(d'après C. M. NICHOLLS)

L'histoire de l'exploitation des piles réparties dans le monde illustre le soin avec lequel l'étude de leur sécurité est faite et l'intérêt qu'on porte à des dispositifs d'arrêt rapide en cas d'incident. Les statistiques montrent que sur 83 piles existant dans le monde en 1956, on avait totalisé 240 années de fonctionnement continu sûr, depuis la première divergence en 1943. Sur un grand nombre d'arrêts rapides**, il semble que moins de 2 p. 100 furent suivis de conséquences graves pour les installations ou les personnes.

Sir John COCKROFF* disait à la fin de la Deuxième Conférence Internationale de Genève, 1958, que le fonctionnement des piles semblait beaucoup plus sûr qu'en 1955. Les progrès faits du côté stabilité, résis-

* Référence [4]

** Arrêts nécessités par des incidents nucléaires.

tance mécanique des enceintes, instruments électroniques et contrôle sont tels, ajoutait-il, qu'on peut prévoir en toute sécurité l'installation des nouvelles piles dans des sites situés dans des régions beaucoup plus habitées. A cette conférence, on n'a pu évoquer, en effet, que trois accidents d'installations nucléaires ayant eu lieu depuis 1955. Ils entraînèrent des dégâts matériels importants certes, comme l'arrêt définitif d'une pile, mais, fort heureusement, aucune conséquence grave pour la santé des exploitants ou des populations. Malgré cette grande sécurité de fonctionnement, qu'il est difficile de retrouver dans beaucoup d'autres industries, des accidents se sont néanmoins produits.

Nous allons essayer de résumer rapidement ceux pour lesquels ont été faites des publications. Et, après l'énumération de ces accidents, nous essayerons de définir les causes d'accidents d'une pile atomique et les méthodes, ou les dispositifs, qui permettent de les éviter.

1.2. Rappel des principaux accidents connus.

1.2.1. Accidents dûs à des ensembles critiques.

Ils ont été plus nombreux au début de l'ère atomique, époque où les connaissances en physique des réacteurs n'étaient pas encore très développées. Ces accidents ont eu souvent pour cause des erreurs de manipulation, telles que le retrait manuel de barres de contrôle sur un ensemble sous critique : quatre expérimentateurs furent ainsi soumis à une dose d'irradiation élevée à Hanford (U.S.A.)

En 1945, à Los Alamos (New Mexico)*, plusieurs accidents

* Référence [5]

eurent lieu sur des ensembles critiques à ^{235}U avec de l'eau ordinaire comme réflecteur. Un de ces ensembles en particulier devint critique par adjonction de matériaux modérateurs, une panne mécanique grossière empêcha de baisser rapidement le niveau de l'eau pour stopper la réaction en chaîne, l'activité qui en résulta fut suffisante pour soumettre deux expérimentateurs à un rayonnement anormal. A Hanford, à la même époque, il y eut des incidents analogues au cours d'études sur les dangers des solutions de plutonium ; il n'y eut que des dégâts matériels. Par la suite, on se montra plus prudent au cours des expérimentations, et on se mit à utiliser des télécommandes pour exécuter toutes les manoeuvres et les manipulations sur piles. Des pannes de mécanismes entraînèrent, de 1951 à 1954, trois accidents qui n'eurent pour conséquences que des dégâts matériels.

Des erreurs de calcul, au début, furent aussi la cause de surcriticalités qui, le plus souvent n'entraînèrent pas d'accidents de personne.

1.2.2. Accidents dûs à des fausses manoeuvres.

Ces fausses manoeuvres ont souvent été faites pendant des mesures ou des essais effectués sur les barres de contrôle.

A Los Alamos (New Mexico, USA)* en 1949, en déterminant le temps de chute des barres de sécurité, deux barres de contrôle de la pile furent retirées manuellement du coeur. L'ensemble devînt critique sans qu'on puisse s'en rendre compte (aucun appareil de contrôle n'était branché). Le coefficient de température négatif permit seul de stopper la divergence. Un seul expérimentateur fut soumis à une dose d'irradiation anormale.

* Référence [5]

A Argonne (National Laboratory, USA) en juin 1952, * lors de la mise en place de nouvelles barres de contrôle, on décida de commander, à partir du tableau de commande, le retrait progressif d'une d'entre elles qui devait entraîner la divergence de la pile. Sans réfléchir un opérateur alla au-dessus de la pile pour la retirer manuellement, beaucoup plus vite. La pile devenant très rapidement surcritique, une explosion se produisit et il laissa alors rapidement tomber la barre de contrôle qu'il tenait. Quatre personnes furent soumises à des doses d'irradiation égales à plusieurs fois la dose normale, la cuve et les fixations de la pile furent endommagées, les barreaux de combustible déformés.

* *

Sur la pile américaine E. B. R. I., au cours d'expériences de montée en puissance à partir de niveaux très faibles, on savait que le coefficient de température était négatif. On décida de ne pas toucher aux barres de contrôle et de n'agir que sur la vitesse du fluide réfrigérant. On supprima le pilotage automatique et seule une commande manuelle restait à la disposition du conducteur de pile. A la suite d'un malentendu entre expérimentateur et conducteur de pile, les barres de sécurité qui devaient à un instant donné être introduites rapidement ne le furent qu'à faible vitesse. Le taux d'antiréactivité fut ainsi insuffisant pour arrêter rapidement la pile. Plusieurs barreaux de combustible fondirent. Malgré un niveau de radiations intense, il n'y a pas eu d'accident de personne. On eut seulement à déplorer une légère contamination du fluide réfrigérant NaK et des difficultés de déchargement des barreaux combustible fondus.

* Référence [5] ** Référence [6]

1.2.3. - Accidents dûs à des pannes d'appareillages électriques électroniques ou mécaniques.

On peut citer l'accident survenu à la pile américaine SRE* en 1959 où de graves dégâts ont été causés aux éléments combustibles. Des anomalies du côté fluctuations spaciales de puissance avaient été observées, ce qui entraînait aussi des anomalies du point de vue répartition des températures. Au cours d'une nouvelle marche des oscillations se produisirent dont l'une avait une pseudo période de 7,5 secondes. La pile fut alors arrêtée manuellement. La sécurité qui devait fonctionner à partir du seuil de période inférieur à 10 secondes (sécurité liée à un enregistreur) ne fonctionna pas.

La cause des fluctuations n'a pas été déterminée avec précision (diminution du coefficient de température du graphite avec la température ambiante, formation de vide, entraînement de gaz dans le fluide réfrigérant). On mit seulement en évidence un peu plus tard que le contact de l'enregistreur utilisé pour le déclenchement de la sécurité période n'était sensible qu'à des variations lentes de période, mais non à des variations rapides (à cause de l'inertie de l'équipage).

Un accident important est survenu sur la pile canadienne NRX le 12 décembre 1952.** Cette pile n'était pas sans défaut en ce qui concerne la stabilité et la sûreté de fonctionnement. L'eau lourde sert de modérateur et le refroidissement des barreaux combustibles est effectué à l'aide d'eau ordinaire. Le pouvoir absorbant de l'eau légère l'emportant sur ses qualités modératrices, la présence de celle-ci est défavorable à la réactivité. Si un excès de puissance provoque une vaporisation de l'eau légère, la pile a tendance à s'emballer.

* Référence [7] ** Référence [8]

L'accident s'est produit au cours d'expériences effectuées à faible puissance, 10 p. 100 des barres d'uranium avaient un débit d'eau de refroidissement réduit. A la suite de défaillances humaines et d'un concours de circonstances particulièrement défavorables, une panne mécanique du système d'arrêt de la pile entraîna une brusque augmentation de la puissance. Alors qu'en marche normale, la puissance de la pile était de 30 MW, il y eut une excursion de puissance rapide avec un maximum de 100 MW et une énergie libérée de 1 800 MWs. Ce qui entraîna la fusion de nombreux barreaux de combustible, des ruptures de gaines et une dispersion importante des produits de fission dans l'eau et le gaz auxiliaire de refroidissement. Il fallut démonter entièrement la pile et on se heurta à de grosses difficultés de décontamination. La pile, complètement modifiée, ne put redémarrer que le 17 février 1954.

Un incident se produisit sur la pile américaine HTRE 3.* La pile étant en fonctionnement normal, le pilotage automatique était en service. Soudain l'aiguille de l'enregistreur de période allant en butée basse de l'échelle, le servomécanisme applique alors un signal < 0 au dispositif de commande de la barre de contrôle qui se mit à sortir du coeur. L'excursion de puissance ne fût arrêtée que par une perte de réactivité liée à la fusion d'une partie du combustible. Une chute de barres eut lieu néanmoins, grâce au fonctionnement d'une sécurité-température par fusion des fils d'un thermocouple qui se trouvait dans le combustible fondu.

Les causes de l'accident n'ont pas été très nettement définies. On remarqua néanmoins que la valeur de la haute tension d'une chambre d'ionisation de contrôle n'était que de 746 volts au lieu de 1500 volts (valeur nominale). De plus, un filtre de bruit utilisé pour d'autres expériences avait

* Référence [7]

été laissé branché, limitant ainsi le courant susceptible d'être délivré par la chambre. On prouva ainsi que la chambre d'ionisation ne pouvait pas débiter le courant de 0,84 mA nécessaire pour faire fonctionner la sécurité par dépassement de puissance.

1.2.4. Accidents dûs à la conception initiale de la pile ou de son contrôle.

On peut classer dans cette catégorie, l'accident malheureux qui eut lieu sur la pile expérimentale à uranium naturel et eau lourde de l'Institut de Sciences Nucléaires "Boris Kidric" de Belgrade en Yougoslavie (octobre 1958)*. Aucune protection n'avait été prévue autour de la cuve**. De plus, le remplissage de cette dernière avec de l'eau lourde pouvait s'effectuer sans qu'au préalable une chaîne de mesure soit mise en service. Le fonctionnement de la pompe de remplissage n'était pas minuté. On mit cette dernière en service sans suivre le niveau d'eau atteint. Le réacteur devint surcritique alors que cinq physiciens se trouvaient à proximité de la cuve. Ils subirent des doses d'irradiation atteignant pour certains la dose létale ($\simeq$ 500 Roentgens).

Il faut aussi citer l'accident survenu sur la pile anglaise n° 1 de Windscale le 10 octobre 1957***. On sait que les piles anglaises de Windscale sont plutonigènes ; elles utilisent comme combustible de l'uranium naturel, sont modérées au graphite et refroidies à l'air. Pendant le deuxième recuit effectué sur le modérateur en graphite de la pile n° 1 par rechauffage nucléaire (divergence de la pile sans refroidissement), 150 barreaux de combustible d'uranium ainsi qu'une partie du graphite prirent feu à la suite de rupture de gaînes. Certains produits de fission furent déversés aux alentours de Windscale. On dut noyer la pile pour stopper l'incendie. On n'eut pas à déplorer d'accidents de personnes, les

* Référence [9] et [10] *** Référence [11]

** Pour des raisons expérimentales.

habitants de la région de Windscale furent seulement privés de lait pendant quelques jours. La pile était inutilisable après accident. Devant l'ampleur des réparations à faire et des modifications à apporter à la pile n° 2, l'Atomic Energy Authority décida d'arrêter définitivement les 2 piles de Windscale.

En 1952, lorsque fut étudiée la construction de ces piles, on connaissait mal l'effet Wigner et les moyens de le combattre. C'est ce qui explique sans doute que l'on n'ait pas prévu, pour les opérations de rechauffage du graphite, l'installation d'instruments de mesure thermodynamique en plus grand nombre (en particulier du côté thermocouples) et, en fonctionnement normal, une température d'entrée du fluide réfrigérant plus élevée. A partir de ces accidents connus on peut essayer de définir les différentes causes probablesdd'accidents d'une pile atomique et les remèdes qui peuvent être apportés pour les éviter.

1.3. Différentes causes probables d'accidents d'une pile atomique et Précautions à prendre pour éviter ces accidents.

1.3.1. Accidents d'origine nucléaire.

Ces accidents peuvent avoir pour causes des erreurs de chargements : l'assemblage du coeur peut être réalisé correctement mais être néanmoins plus réactif que prévu. Il peut y avoir aussi utilisation d'un combustible plus enrichi que prévu ou encore,par exemple un nombre de plaques supérieur à celui prévu pour un élément combustible. Les conséquences de cette criticalité accidentelle sont le haut niveau de radiations, l'élévation de température, voire même la fusion des éléments combustibles avec dispersion des produits de fission et des sources.

Il y a lieu de faire vérifier les calculs de réseau par plusieurs physiciens, d'avoir une procédure très stricte dans le cas du stockage avec plusieurs enrichissements (double vérification souhaitable), d'être très prudent pendant les périodes de chargement, enfin, l'excédent d'antiréactivité disponible doit être toujours supérieur à la plus grande réactivité susceptible d'être introduite dans le coeur. Un coefficient de température du combustible < 0 sera toujours recherché.

Des accidents peuvent se produire aussi à la suite d'addition de réactivité à partir de l'état sous critique ou critique. C'est ainsi que dans le cas d'inondation ou remplissage accidentel de la cuve de la pile aussi bien avec le modérateur normal qu'avec tout autre liquide ou gaz des quantités importantes de réactivité peuvent être libérées. Par exemple l'introduction accidentelle d'un matériau hydrogène dans le coeur d'une pile rapide peut conduire à un accident très grave. Il faut éviter que des conduites d'eau ou de vapeur se trouvent au-dessus du coeur pile. Il y a lieu de faire une vérification sérieuse des étanchéité et de disposer de plusieurs arrêts d'urgence et même de vidange rapide liés à des mesures neutroniques. L'introduction d'eau froide dans un coeur chaud peut aussi entrainer une augmentation de réactivité. Il faut alors apporter un soin attentif au mauvais fonctionnement des vannes et des pompes pouvant entraîner l'introduction d'eau froide dans le coeur.

Une nouvelle disposition géométrique du matériau fissible peut aussi libérer de la réactivité. Cette nouvelle disposition peut être entraînée par la fusion totale ou partielle des éléments combustibles et leur répartition en une géométrie critique, ceci est surtout valable, bien entendu, pour les piles rapides. Il faut éviter la fusion du coeur et étudier la répartition du liquide de fusion éventuelle en une géométrie non critique. L'utilisation de fusibles pourra être faite pour séparer*

* Séparation automatique

le coeur en plusieurs parties en cas de fusion.

Enfin de la réactivité peut être aussi libérée par des retraits d'absorbeurs fixes ou mobiles: retrait par erreur de barres de contrôle à grande vitesse avec dépassement de butées fixes, déplacements d'absorbants fixes,d'encombrement réduit,ou se présentant sous forme d'expériences d'irradiation. Il faut aussi rendre impossible la chute dans le coeur d'éléments combustibles. Les systèmes d'arrêt d'urgence doivent être assez efficaces pour éviter l'accident lié au retrait à vitesse maximum de toutes les barres de contrôle. Des verrouillages électriques et mécaniques doivent empêcher le retrait intempestif des barres de contrôle. Les absorbants ne doivent être introduits dans le coeur qu'à la condition qu'il soit impossible qu'ils sortent intempestivement ou qu'ils puissent fondre.

1.3.2. Accidents qui entraînent la surchauffe du combustible ou du modérateur.

L'élévation de température du combustible ou du modérateur peut provenir de causes nucléaires déjà citées, de la diminution du débit du fluide réfrigérant, de la diminution de pression du fluide réfrigérant, du manque de contrôle du système d'évacuation des calories et éventuellement de l'incendie. Il faudra le plus souvent disposer d'appareils d'alerte avec des vitesses de réponse convenables de façon à pouvoir mettre en jeu des actions rapides automatiques susceptibles de limiter les conséquences des accidents. Il est toujours nécessaire de prévoir un système susceptible d'évacuer en toutes circonstances la puissance résiduelle.

1.3.3. Accidents entraînés par le feu.

Le feu pourra être la cause directe d'un accident nucléaire ou d'une réaction chimique. En général, pour les piles au graphite, la capacité thermique du modérateur est très importante et il faudra une source de chaleur très importante pour l'enflammer. Les possibilités de combustion du combustible et de son gainage sont toujours à envisager. Il faudra le plus souvent que la pile soit placée dans un bâtiment résistant au feu ; les matériaux inflammables seront à exclure de ce local.

Chapitre II

LES ACCIDENTS PROBABLES PENDANT LE FONCTIONNEMENT DES PILES ATOMIQUES.

Les accidents qui sont les plus probables pendant la vie d'une pile atomique et qui sont le plus souvent envisagés dans les études concernant la sécurité sont : l'accident de démarrage et l'accident de réfrigération.*

2.1. Accident de démarrage.

C'est souvent pendant cette période de marche de la pile que les accidents les plus graves sont susceptibles de se produire. L'accident est souvent fonction à la fois des caractéristiques nucléaires et thermodynamiques de la pile et du taux d'insertion de réactivité. Dans la gamme des puissances de démarrage, les coefficients de température de réactivité ne peuvent pas, le plus souvent, jouer car la puissance thermique dégagée est faible. Aussi, le démarrage d'une pile demeure certainement une des opérations les plus délicates dans sa conduite. Il est fondamental de pouvoir suivre à tout instant dans cette opération l'évolution de la puissance neutronique et veiller à ce que cette évolution soit limitée par le taux des neutrons retardés. Nous donnerons un peu plus loin quelques indications sur les relations qui définissent la puissance neutronique et la période d'évolution de cette puissance en fonction de la vitesse de libération de réactivité.

* Référence [12]

2.2. L'accident de réfrigération.

Cet accident est lié aux pannes intervenant sur le système d'évacuation des calories, par exemple la rupture du circuit primaire.

On sait qu'il est impossible d'annuler complètement la puissance neutronique d'une pile une fois qu'elle a fonctionné à quelque puissance. Même si toutes les barres de contrôle, compensation et sécurité sont à l'intérieur du coeur, la puissance résiduelle n'est jamais nulle.* Par exemple, pour une pile à uranium naturel sans source, modérée au graphite, elle est due aux fissions spontanées et ne dépasse jamais quelques milliwatts, même pour une pile de puissance. Pour une pile à modérateur à eau lourde, ou béryllium qui a déjà fonctionné, les rayons γ issus des produits de fission qui se sont accumulés dans l'uranium sont capables de dissocier les noyaux de deutérium du modérateur et de fournir des neutrons dont le nombre peut être très supérieur à celui émis par les fissions spontanées.

En dehors de cette puissance neutronique résiduelle qu'on ne peut jamais annuler, une énergie calorifique non négligeable est fournie par la désintégration des produits de fission accumulés dans les barreaux combustibles lorsqu'une pile a fonctionné pendant un certain temps.** Cette énergie représente environ 6 p. 100 de la puissance calorifique de la pile après quelques secondes d'arrêt et ne décroît ensuite que lentement suivant une loi en $t^{-0,2}$ si t représente le temps (loi de WAY-WIGNER). Ainsi un élément d'uranium qui a travaillé J jours consécutifs à la puissance Po dégage, après un arrêt de t jours, une puissance approximative égale :

$$P = 5,9 \cdot 10^{-3} \; Po \left[t^{-0,2} - (t + J)^{-0,2} \right]$$

* Référence [13] ** Référence [14]

Cette formule n'est qu'approchée et ne vaut que pour des arrêts t dépassant 10 secondes. On peut constater qu'après un fonctionnement de longue durée, la puissance résiduelle est loin d'être négligeable pour une pile de puissance. Sa loi de décroissance en fonction du temps est sensiblement exponentielle.

Sur la figure 2-1 a été tracée la courbe de la variation de la puissance résiduelle totale et de la puissance $\beta\gamma$ en fonction du temps pour un élément combustible du type EL 3 enrichi à 1,6 p. 100 et placé près du centre, cet élément ayant séjourné en pile pendant 120 jours, la marche de la pile étant de 17,5 MW.*

Sur la figure 2-2, on a porté les résultats des calculs faits à ANL (USA)** concernant la pile MTR et la pile de Brookhaven. Les courbes représentent l'évolution de la température après arrêt complet du système de réfrigération.

Ces élévations rapides de température qui peuvent entraîner la fusion du coeur sont dues aux valeurs élevées des puissances spécifiques. En effet, dans les piles atomiques de puissance, les puissances spécifiques sont beaucoup plus importantes que dans les installations classiquesde production d'énergie. C'est ainsi que si dans une chaudière moderne on a quelques watts / litre, pour une pile à neutrons thermiques on a quelques dizaines de kilowatts / litre, alors que pour une pile à neutrons rapides on a quelques centaines de kilowatts / litre.

Aussi, il apparaît de plus en plus que pour les piles atomiques

* Référence [15] ** Référence [16]

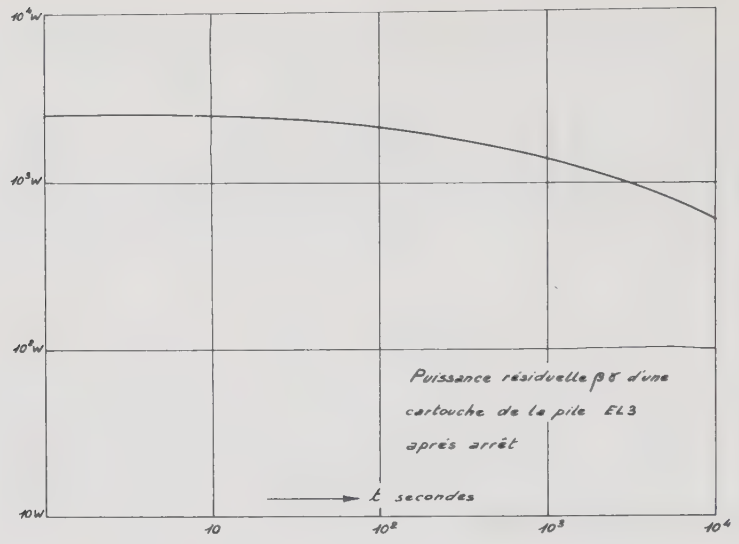

10^4W
10^3W
10^2W
10W
Puissance résiduelle βγ d'une
cartouche de la pile EL3
après arrêt
t secondes
10
10^2
10^3
10^4

Fig : 2_1

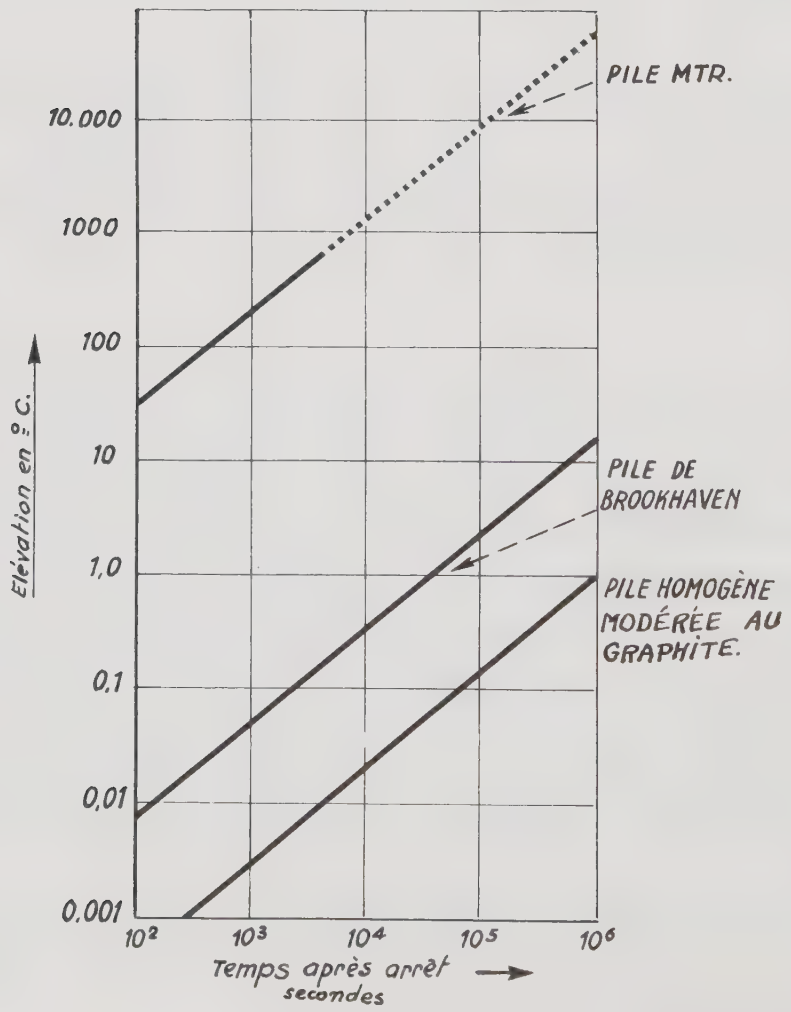

PILE MTR.
PILE DE
BROOKHAVEN
PILE HOMOGÈNE
MODÉRÉE AU
GRAPHITE.
Elévation en °C.
10.000
1000
100
10
1,0
0,1
0,01
0,001
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6
Temps après arrêt
secondes

fig.: 2-2

de puissance un des accidents les plus graves est celui du défaut de réfrigération, manque de débit, élévation de température du combustible, obstruction d'un canal. Par ailleurs, pour ces piles il est toujours nécessaire de disposer d'un ou plusieurs circuits de secours d'évacuation de la puissance résiduelle après arrêt complet de la réaction en chaîne, ces circuits doivent même posséder plusieurs sources d'alimentation en énergie. En effet, il faudra parfois évacuer cette puissance résiduelle plusieurs mois après arrêt, pour ne pas risquer d'échauffement du combustible.

Chapitre III

EVOLUTION DE LA PUISSANCE NEUTRONIQUE EN REGIME D'ACCIDENT.

L'évolution de la puissance neutronique est fonction de la réactivité et cette réactivité peut varier à la suite du déplacement des barres de contrôle, de pilotage, ou de sécurité, ou par modification du coeur de la pile. La loi de variation de la réactivité permet de déterminer au moyen des équations cinétiques, la loi d'évolution de la puissance. Les équations cinétiques s'exprimant par les relations suivantes :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\theta} n + \sum_{i=1}^{i=m} \lambda_i C_i + S \qquad (3\text{-}1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\theta} n - \lambda_i C_i \qquad (3\text{-}2)$$

dans lesquelles :

- n : puissance neutronique,
- θ : vie moyenne des neutrons dans la pile,
- ρ : la réactivité,
- β : fraction des neutrons retardés émis par un neutron de fission,
- C_i : concentration de l'émetteur de neutrons retardés de groupe i,
- β_i : fraction des neutrons retardés émis par l'émetteur de groupe i pour un neutron de fission,

λ_i : constante de désintégration de l'émetteur de neutrons retardés de groupe i.

Ces équations peuvent être simplifiées :
sous la forme dite à "un seul groupe de neutrons retardés" :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho(1-\beta)-1}{\theta} n + \lambda C + S \qquad (3\text{-}3)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\theta} n - \lambda C \qquad (3\text{-}4)$$

dans lesquelles C et λ sont respectivement la concentration des émetteurs de neutrons retardés et λ la constante de désintégration moyennée.

$$\lambda = \frac{\beta}{\sum_{i=1}^{i=m} \frac{\beta_i}{\lambda_i}}$$

Quelle que soit la forme adoptée, la résolution précise des équations cinétiques : équations différentielles non linéaires, ne peut être obtenue qu'au moyen de calculatrices électroniques : machines analogiques ou machines digitales.

Néanmoins, certains auteurs s'appuyant sur des hypothèses simplificatrices ont apporté des solutions pratiques applicables en général à des cas particuliers.

3.1. Evolution de la puissance neutronique sans tenir compte du coefficient de température.

On suppose dans ce cas que ρ n'est pas affecté par l'évolu-

tion de n. Il s'agit alors de calculer cette évolution lorsqu'on impose à ρ une loi de variation quelconque.

En faisant l'hypothèse que l'on part d'un état d'équilibre en régime sous-critique, WALLACH* donne une solution générale du système d'équations (3-1) et (3-2) exprimant l'évolution de la puissance en fonction du temps :

$$n(t) = \alpha \int_0^{\infty} \sum_i (1 + \frac{a x}{\lambda_i})^{\frac{\beta_i \lambda_i}{a}} \; e^{x(\rho_0 + at - \beta) - \frac{1}{2} a \theta x^2} \, dx \qquad (3\text{-}5)$$

α étant une constante déterminée par les conditions initiales; ρ étant définie par l'égalité $\rho = \rho_0 + at$; ρ_0 antiréactivité initiale et a vitesse de libération de réactivité en pcm/s.

Cette relation s'écrit, dans la théorie à un seul groupe de neutrons retardés :

$$n(t) = \varepsilon \int_0^{\infty} (1 + \frac{a x}{\lambda})^{\frac{\beta \lambda}{a}} \; e^{x(\rho_0 + at - \beta) - \frac{1}{2} a \theta x^2} \, dx \qquad (3\text{-}6)$$

ε étant également une constante déterminée par les conditions initiales.

La période en fonction du temps s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{1}{T} = \frac{n'(t)}{n(t)} = \frac{\displaystyle\int_0^{\infty} (1 + \frac{a x}{\lambda})^{\frac{\beta \lambda}{a}} \; x \, a \; e^{x(\rho_0 + at - \beta) - \frac{1}{2} a \theta x^2} \, dx}{\displaystyle\int_0^{\infty} (1 + \frac{a x}{\lambda})^{\frac{\beta \lambda}{a}} \; e^{x(\rho_0 + at - \beta) - \frac{1}{2} a \theta x^2} \, dx} \qquad (3\text{-}7)$$

* Référence [17]

Les intégrales de ces relations ne sont calculables que lorsque le terme $\frac{\beta\lambda}{a}$ est entier ; même dans ce cas on est souvent conduit à de longs calculs surtout du côté des développements asymptotiques.

HURWITZ* a montré que pour de faibles vitesses de variation de réactivité, l'intégration des équations cinétiques par la méthode de BRILLOIN-WENTZEL-KRAMER conduit à l'expression :

$$n(t) = n_o \, f(t) \, e^{\int_{t_o}^{t} \frac{dt}{T}} \qquad (3\text{-}8)$$

$n(t)$ étant la puissance neutronique au temps t,

n_o la puissance neutronique au temps d'origine t_o

$f(t)$ une fonction qui dépend uniquement du temps t

$\frac{1}{T}$ l'inverse de la période au temps t, extraite des courbes de Nordheim. (Période correspondant à la réactivité insérée au temps t).

HURWITZ admet que l'on peut représenter dans ces calculs $\frac{1}{T}$ par une fonction approximativement linéaire ou exponentielle selon que la réactivité est inférieure ou supérieure à β. Il admet aussi qu'au-delà de la criticalité en neutrons prompts f (t) est une constante.

Dans le cas où l'on tient compte de plusieurs groupes de neutrons retardés et lorsqu'on utilise un calculateur du type analogique pour déterminer l'évolution de la puissance sur un grand nombre de décades, il est nécessaire de procéder à des réaffichages périodiques avec changement d'échelles, ou de modifier la forme des équations cinétiques.

* Référence [18]

Si l'on fait apparaître la période T,* on a alors :

$$\frac{1}{T} = \frac{\rho - \beta}{\theta} + \sum_i \lambda_i y_i + z$$

$$\frac{dy_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\theta} - \lambda_i y_i - \frac{y_i}{T} \qquad (3\text{-}9)$$

$$\frac{dz}{dt} = - \frac{z}{T}$$

déduites des relations (3-1) et (3-2) en posant :

$$\frac{1}{T} \equiv \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} \qquad y_i \equiv \frac{C_i}{n} \qquad \text{et} \qquad z \equiv \frac{S}{n}$$

Connaissant T, donc $\frac{1}{T}$, il est facile de retrouver la valeur de n, et vice-versa.

Les courbes des figures 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 et 3-5 explicitent des résultats de calcul d'évolution de puissance concernant des piles du type eau légère uranium enrichi,** la réactivité variant linéairement.

Les valeurs des constantes adoptées sont les suivantes :

$\lambda_1 = 5,347\ s^{-1}$	$\beta_1 = 0,0166\ 10^{-2}$
$\lambda_2 = 1,506\ s^{-1}$	$\beta_2 = 0,1072\ 10^{-2}$
$\lambda_3 = 0,3185\ s^{-1}$	$\beta_3 = 0,3088\ 10^{-2}$
$\lambda_4 = 0,119\ s^{-1}$	$\beta_4 = 0,1434\ 10^{-2}$
$\lambda_5 = 0,0319\ s^{-1}$	$\beta_5 = 0,1533\ 10^{-2}$
$\lambda_6 = 0,0127\ s^{-1}$	$\beta_6 = 0,0257\ 10^{-2}$

* Référence [19] ** Référence [20]

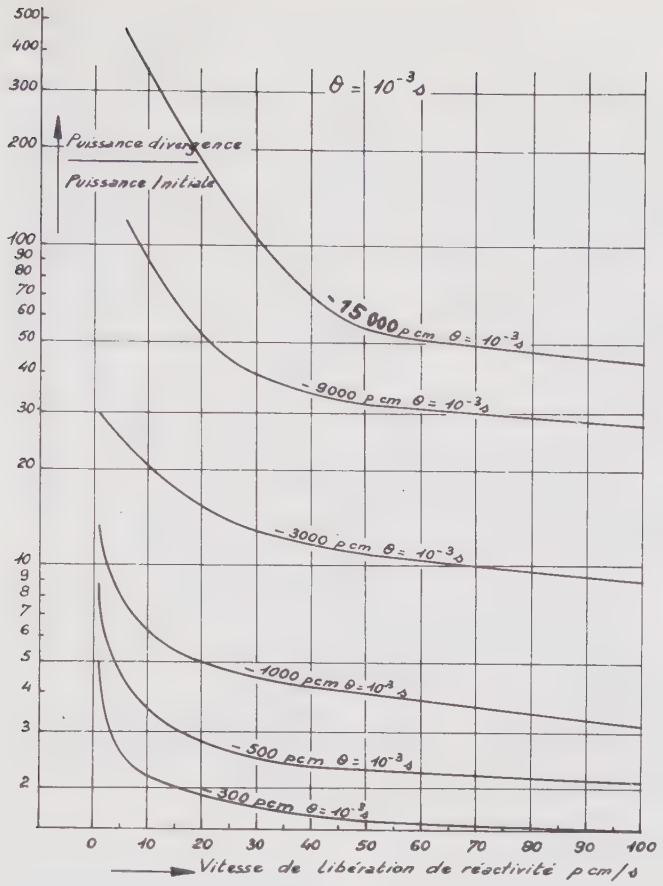

θ = 10⁻³ δ
Puissance divergence
Puissance Initiale
-15 000 p cm θ = 10⁻³ δ
-9000 p cm θ = 10⁻³ δ
-3000 p cm θ = 10⁻³ δ
-1000 pcm θ = 10⁻³ δ
-500 pcm θ = 10⁻³ δ
-300 pcm θ = 10⁻³ δ
Vitesse de libération de réactivité p cm/s

Fig : 3-1

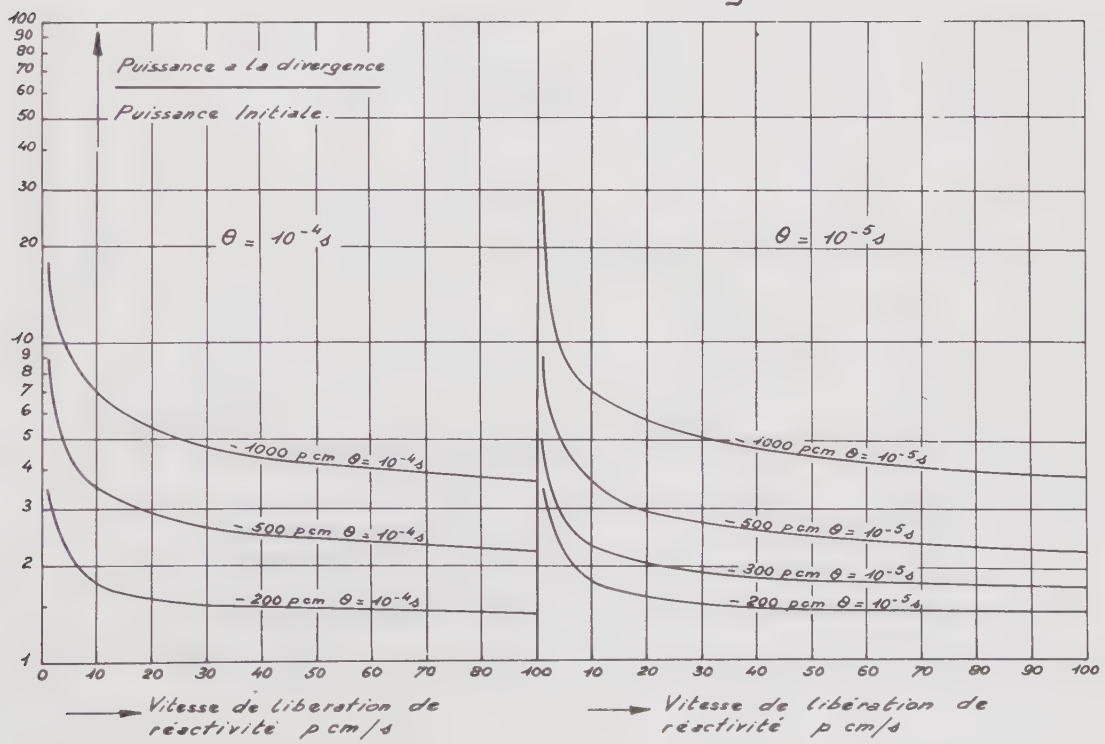

Puissance à la divergence
Puissance Initiale
θ = 10⁻⁴ δ
θ = 10⁻⁵ δ
-1000 p cm θ = 10⁻⁴ δ
-500 pcm θ = 10⁻⁴ δ
-200 pcm θ = 10⁻⁴ δ
-1000 pcm θ = 10⁻⁵ δ
-500 pcm θ = 10⁻⁵ δ
-300 pcm θ = 10⁻⁵ δ
-200 pcm θ = 10⁻⁵ δ
Vitesse de liberation de réactivité p cm/s
Vitesse de libération de réactivité p cm/s

Fig : 3-2

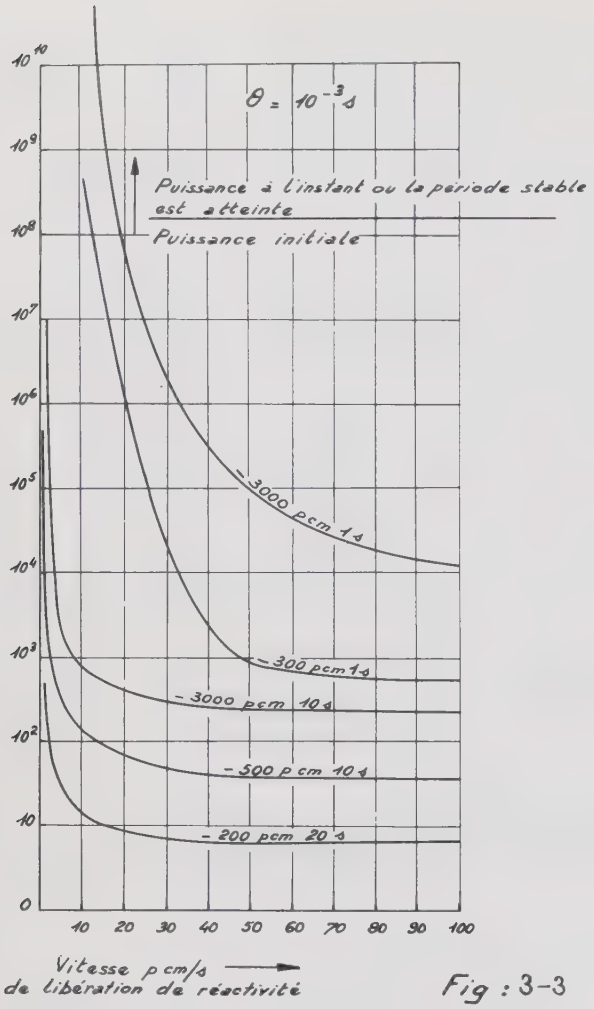

θ = 10⁻³ s
Puissance à l'instant où la période stable est atteinte
Puissance initiale
- 3000 pcm 1 s
- 300 pcm 1 s
- 3000 pcm 10 s
- 500 pcm 10 s
- 200 pcm 20 s
Vitesse pcm/s
de libération de réactivité

Fig : 3-3

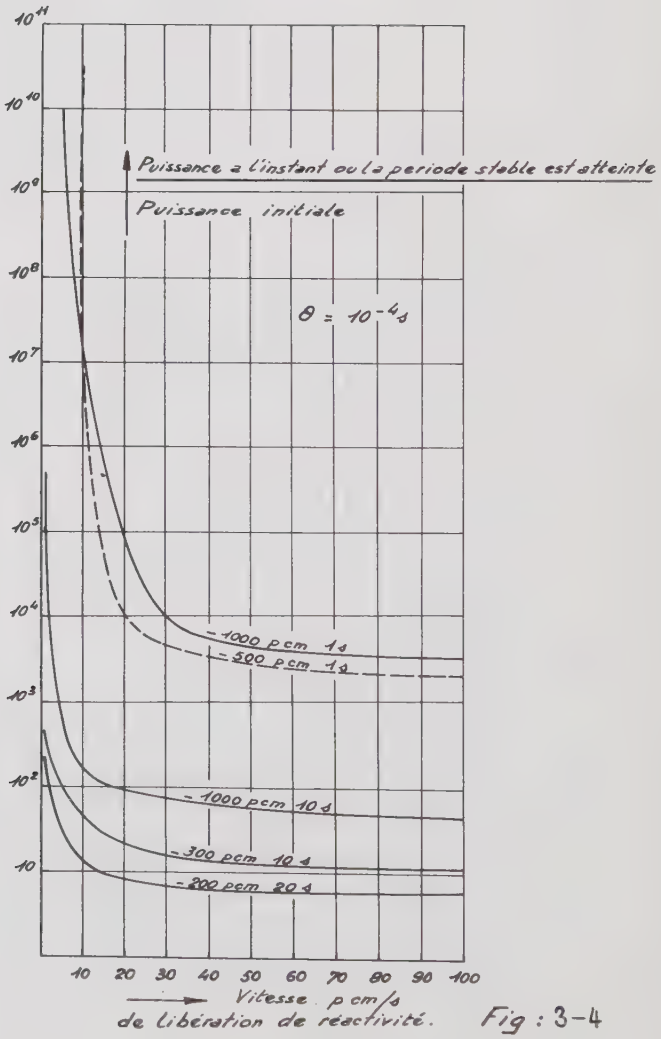

Puissance à l'instant où la période stable est atteinte
Puissance initiale
θ = 10⁻⁴ s
- 1000 pcm 1 s
- 500 pcm 1 s
- 1000 pcm 10 s
- 300 pcm 10 s
- 200 pcm 20 s
Vitesse pcm/s
de libération de réactivité.

Fig : 3-4

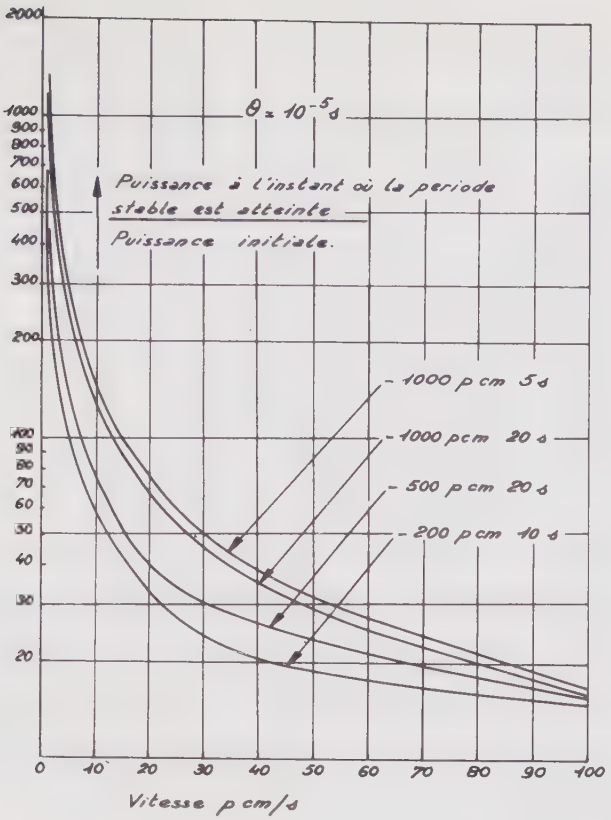

$\theta = 10^{-5}$ s
Puissance à l'instant où la période stable est atteinte
Puissance initiale.
- 1000 p cm 5 s
- 1000 pcm 20 s
- 500 p cm 20 s
- 200 p cm 10 s
Vitesse p cm/s

Fig : 3-5

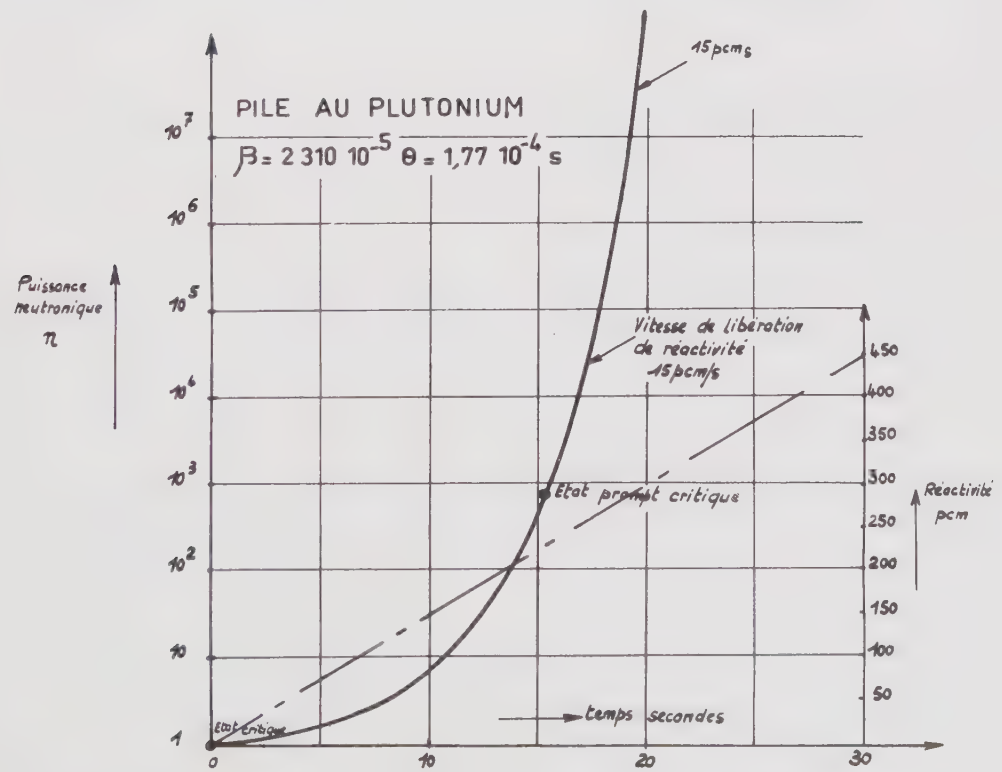

PILE AU PLUTONIUM
$\beta = 2\,310\ 10^{-5}$ $\theta = 1{,}77\ 10^{-4}$ s
15pcm/s
Puissance neutronique n
Vitesse de libération de réactivité 15pcm/s
Etat prompt critique
Réactivité pcm
temps secondes
Etat critique

FIG 3-6

$$\lambda_3 = 0,124\ s^{-1} \qquad \beta_3 = 48,8\ 10^{-5}$$
$$\lambda_4 = 0,325\ s^{-1} \qquad \beta_4 = 75,2\ 10^{-5}$$
$$\lambda_5 = 1,12\ s^{-1} \qquad \beta_5 = 19,8\ 10^{-5}$$
$$\lambda_6 = 2,29\ s^{-1} \qquad \beta_6 = 10,2\ 10^{-5}$$

$\beta = 230\ 10^{-5}$ et $\theta = 1,77\ 10^{-4}$ s

Certains résultats intéressants relatifs aux calculs des expressions (3-5) et (3-6) ont été établis par J.E. WILKINS* dans le cas d'une variation linéaire de réactivité. Ces résultats permettent de calculer la puissance de la pile à l'instant où elle est critique en neutrons prompts.

Si t_{pc} représente le temps que met la pile pour être critique en neutrons prompts, on a :

$$\rho_o - \beta + a t_{pc} = 0$$

d'où :

$$t_{pc} = \frac{\beta - \rho_o}{a}$$

et

$$n(t_{pc}) = \frac{b_o}{2} \left(\frac{2\beta^2}{\sigma}\right)^{\frac{m+1}{2}} \Gamma\left(\frac{m+1}{2}\right) \qquad (3\text{-}10)$$

$$\sum_i C_i = \frac{b_o}{4} \left(\frac{2\beta^2}{\sigma}\right)^{\frac{m+2}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \qquad (3\text{-}11)$$

b_o est une constante fonction de $\frac{\lambda_i \beta}{a}$, β_i, $\frac{\beta - \rho_o}{a}$, et des conditions initiales $n_{(o)}$, $C_{i(o)}$,

* Référence [22]

les temps de vie variant de 10^{-3} s à 10^{-5} s.

Les courbes des figures 3-1 et 3-2 représentent les variations du rapport : Puissance à la divergence / Puissance initiale en fonction de la vitesse de libération de réactivité pour différentes conditions initiales au point de vue réactivité et pour des temps de vie moyen des neutrons dans la pile : 10^{-3} s, 10^{-4} s et 10^{-5} s.

Les courbes des figures 3-3, 3-4 et 3-5 représentent les variations du rapport : Puissance à l'instant où la période stable est atteinte / Puissance initiale, en fonction de la vitesse de libération de réactivité pour différentes conditions initiales au point de vue réactivité et pour des temps de vie moyens des neutrons dans la pile 10^{-3} s, 10^{-4} s et 10^{-5} s. On stoppe ici l'insertion de réactivité pour atteindre la période stable indiquée dans chaque cas particulier.

On constate que ces rapports varient assez peu avec la vitesse de libération de réactivité à partir de 50 p. c. m. / s.

Les courbes des figures 3-6 et 3-7 explicitent les résultats de calcul d'évolution de puissance concernant des piles du type à solution de plutonium, la réactivité variant linéairement.*

Les valeurs adoptées pour les groupes de neutrons retardés sont les suivantes :

$$\lambda_1 = 0,0128\ s^{-1} \qquad \beta_1 = 8,02\ 10^{-5}$$
$$\lambda_2 = 0,0301\ s^{-1} \qquad \beta_2 = 68,8\ 10^{-5}$$

* Référence [21]

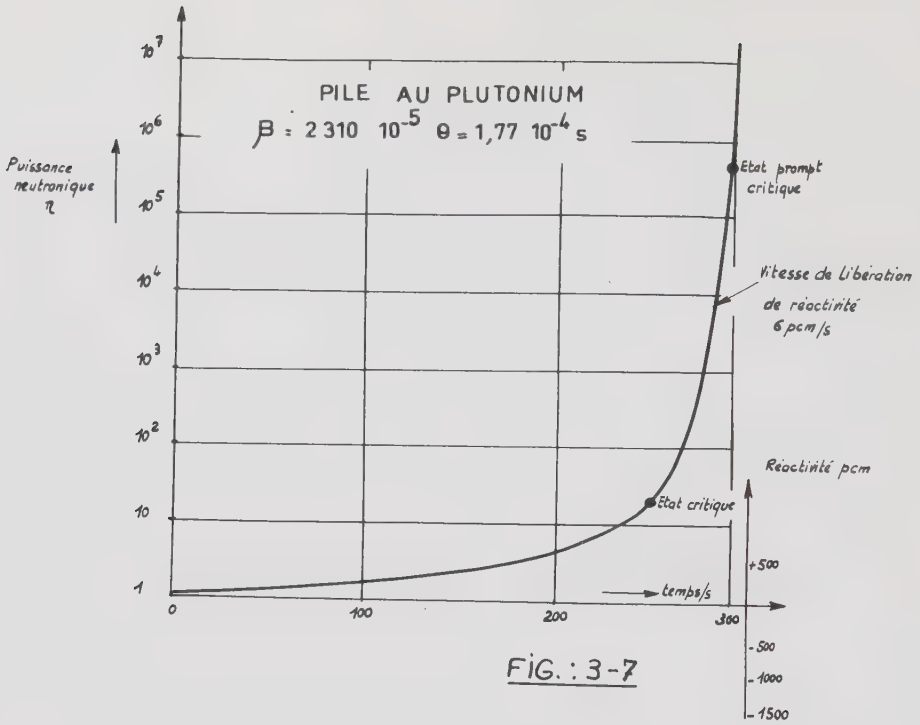

PILE AU PLUTONIUM
β = 2 310 10⁻⁵ θ = 1,77 10⁻⁴ s
Puissance neutronique n
Etat prompt critique
Vitesse de libération de réactivité 6 pcm/s
Réactivité pcm
Etat critique
temps/s
+500
-500
-1000
-1500

FIG. : 3-7

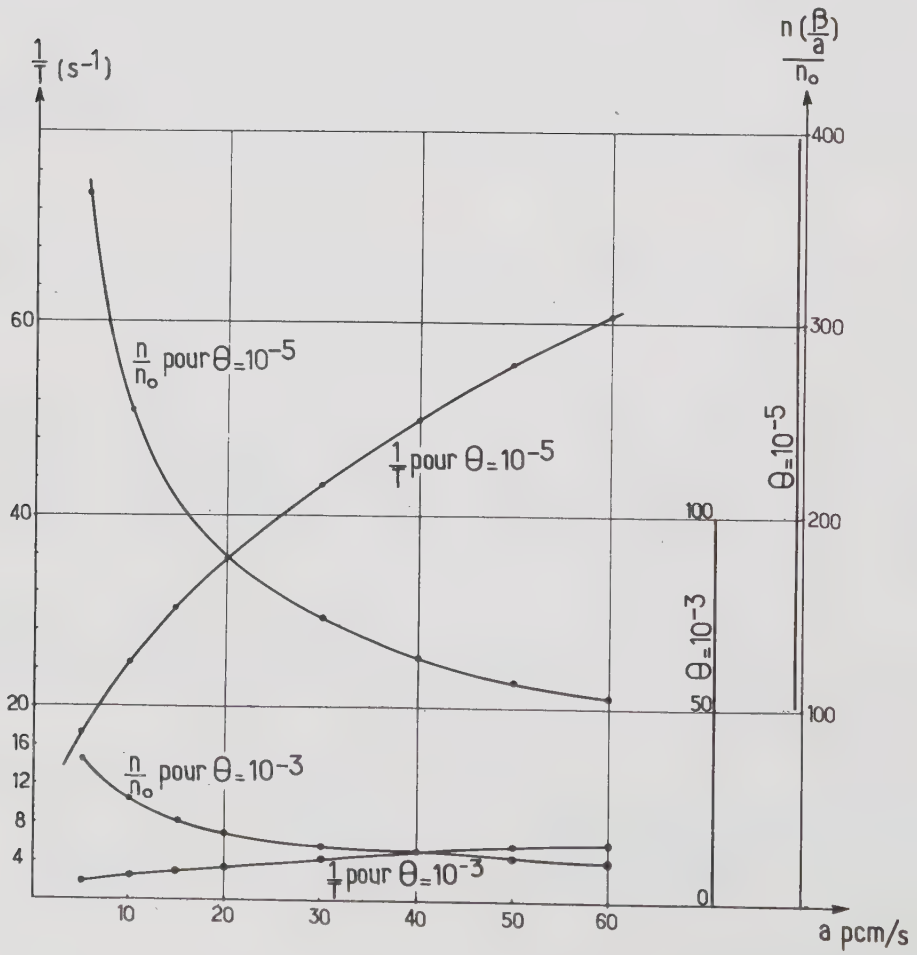

1/T (s⁻¹)
n(β/a)/n₀
n/n₀ pour θ=10⁻⁵
1/T pour θ=10⁻⁵
θ=10⁻⁵
θ=10⁻³
n/n₀ pour θ=10⁻³
1/T pour θ=10⁻³
a pcm/s

fig.: 3-8

$$m = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\beta_i \lambda_i}{a}, \quad \Gamma : \text{fonction factorielle}, \quad \sigma = \frac{a\theta}{\beta}$$

L'inverse de la période a pour valeur :

$$\frac{1}{T} = \frac{n'(t_{pc})}{n(t_{pc})} = \frac{(\frac{2a}{\theta})^{\frac{1}{2}} \Gamma(\frac{m+2}{2})}{\Gamma(\frac{m+1}{2})} \qquad (3\text{-}12)$$

Dans le cas où l'on ne tient compte que d'un seul groupe de neutrons retardés, les formules précédentes (3-10) et (3-11) se simplifient et l'on a :

$$n(t_{pc}) = n(o)\, e^{-\frac{\lambda\beta}{a}} \frac{\Gamma(1/2)}{\Gamma(1+\frac{\beta\lambda}{2a})} (\frac{\beta^2}{2\theta\lambda})^{\frac{1}{2}+\frac{\beta\lambda}{2a}} \simeq n(o) (\frac{\pi\beta^2}{2a\theta})^{\frac{1}{2}} \qquad (3\text{-}13)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{n'}{n} = -\lambda + \frac{\Gamma(1+\frac{\beta\lambda}{2a})}{\Gamma(1/2+\frac{\beta\lambda}{2a})} \sqrt{\frac{2a}{\theta}} \simeq (\frac{2a}{\pi\theta})^{\frac{1}{2}} \qquad (3\text{-}14)$$

On indique sur la figure 3-8 les valeurs de $\frac{n}{n(o)}$ et $\frac{1}{T}$ pour une pile à ^{235}U, pour $t = \frac{\beta}{a}$ avec $\beta = 640$ p.c.m. et $\theta = 10^{-3}$ s ou 10^{-5} s ; a variant entre 5 et 60 p.c.m./s.

3.2. Evolution de la puissance neutronique en tenant compte du coefficient de température.

On sait que la variation de température, principalement celle

du combustible et du modérateur influe sur la valeur de la réactivité.

En effet, on sait que la réactivité est définie par

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

expression dans laquelle k_{eff} est le rapport entre les populations de neutrons de deux générations successives. On a $k_{eff} = \varepsilon, \eta, \rho, f, F$.*

La variation de la vitesse relative des noyaux et des neutrons ou "Effet Doppler" modifie le facteur anti-trappe p de ^{238}U. D'autre part, f et η, respectivement probabilité de capture des neutrons thermiques dans l'uranium et nombre de neutrons émis par fission due à un neutron thermique après capture, varient avec les différentes sections efficaces qui sont elles mêmes fonction de la température des neutrons. De même les constantes physiques qui caractérisent le réacteur : dimensions géométriques (Laplacien) et densités des matériaux sont aussi fonction de la température.

L'effet global de la température sur la réactivité s'exprime donc le plus souvent par la relation :

$$\rho = \rho_o + \alpha_u (T_u - T_{uo}) + \alpha_m (T_m - T_{mo}) \qquad (3\text{-}15)$$

α_u et α_m étant les coefficients respectifs de température de l'uranium et du modérateur exprimés en réactivité par °C

T_u et T_m températures moyennes du combustible et du modérateur.

Ces effets de température sont très variables bien entendu d'une pile atomique à l'autre, mais ils sont le plus souvent négatifs.

* Référence [23]

Valeurs approximatives de coefficients de température :

EL 2 (Saclay) $\alpha_u = -1,25$ p.c.m./°C

$\alpha_m = -7,75 - 0,35\,t$ p.c.m./°C

EL 3 (Saclay) $\alpha_u = -1,4$ p.c.m./°C

Pile de Brookhaven (U.S.A.) $\alpha_u = -2,4$ p.c.m./°C

Yankee Reactor (U.S.A.) $\alpha_u = -2,3$ p.c.m./°C

Si l'on tient compte du coefficient de température, l'évolution de la puissance ne peut plus se calculer à l'aide des équations (3-1) et (3-2) et il y a lieu bien entendu de tenir compte des équations qui définissent le comportement thermique de la pile.

En régime d'accident, les évolutions de puissance sont rapides et on peut en première approximation négliger le coefficient de température du modérateur (ce coefficient n'intervenant le plus souvent qu'avec une constante de temps relativement importante). Dans ce cas il est possible d'utiliser pour calculer l'évolution de la puissance les équations suivantes :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\theta} P + \sum \lambda_i C_i \qquad (3\text{-}16)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\theta} P - \lambda_i C_i \qquad (3\text{-}17)$$

$$\frac{dT_u}{dt} = \delta P - \chi (T_u - T_{mo}) \qquad (3\text{-}18)$$

$$\rho = \rho_e + \alpha_u (T_u - T_{mo}) \qquad (3\text{-}19)$$

dans lesquelles P représente la puissance de la pile, T_u la température moyenne de l'uranium (valeur intermédiaire entre celle de la gaine et du point chaud), T_{mo} température du fluide réfrigérant au début de l'évolution de puissance. Si l'on ne s'intéresse qu'au début de l'évolution, on peut supposer que cette température ne subit pas de variations importantes. δ est le coefficient d'échauffement de l'uranium et χ le coefficient d'échange thermique entre combustible et fluide réfrigérant. ρ_e réactivité introduite.

Ces équations ont été appliquées dans le cas d'une pile à uranium eau lourde du type EL 3* pour laquelle on a pris pour valeurs de χ et δ :

$\chi = 0,8181\ s^{-1}$ et $\delta = 12°C / s / MW$.

La résolution du système d'équations a été faite sur calculatrice analogique.

Les courbes de la figure 3-9 représentent les évolutions de puissance et de température uranium dans le cas d'une libération intempestive de réactivité de l'ordre de 70 p. c. m. / s, la puissance initiale de la pile étant de l'ordre de 10 MW, puissance qui correspond à sa marche nominale de fonctionnement.

Sur la figure 3-10, on a tracé les évolutions de la puissance de la température uranium dans le cas d'une libération intempestive de réactivité de l'ordre de 2000 p.c.m./ s, la puissance initiale de fonctionnement de la pile étant de 15 MW.** La courbe qui représente l'évolution de la réactivité montre bien l'influence du coefficient de température et son effet stabilisateur sur l'évolution de la puissance.

* Référence [24] ** Référence [25]

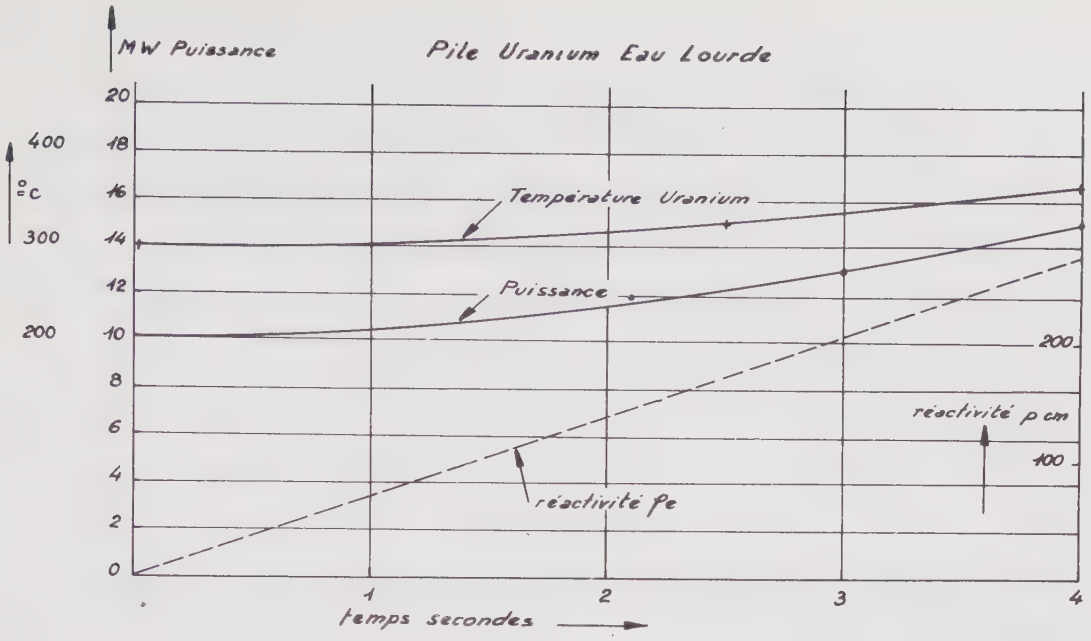


Fig : 3-9

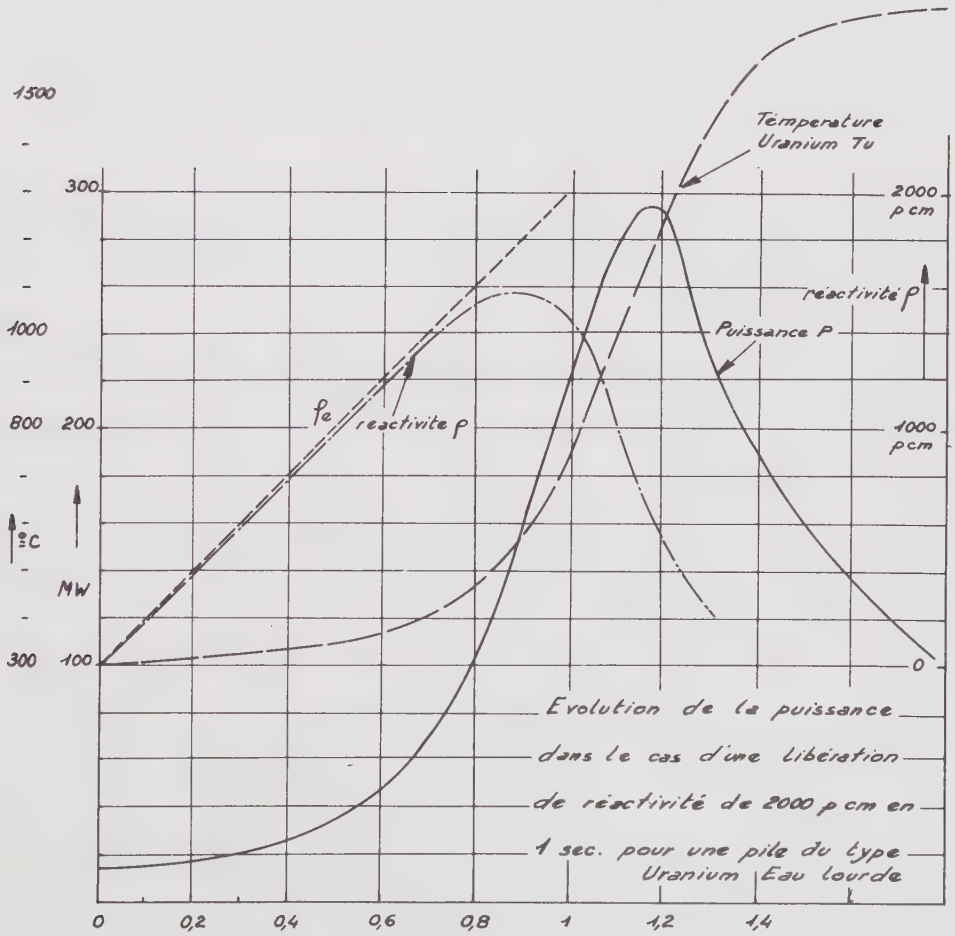


Fig : 3-10

Les courbes de la figure 3-11 représentent les évolutions de puissance pour la même pile dans le cas de libération intempestive de réactivité. La vitesse de libération de réactivité étant comprises entre 15 p. c. m. / s et 105 p. c. m. / s. La pile se trouve initialement à l'état sous critique, l'antiréactivité initiale étant de l'ordre de - 4 000 p. c. m. On peut constater que dans tous les cas l'effet stabilisateur du coefficient de température ne se fait sentir qu'à partir de quelques MW.

3. 3. Méthodes approchées du calcul des évolutions de puissance en régime d'accident.

Ces méthodes ont surtout été développées dans le cas ou l'on utilise les équations cinétiques dans la théorie à un seul groupe de neutrons retardés. Nous rappellerons d'abord rapidement les cas suivants :

a) Cas du saut positif de réactivité sans tenir compte du coefficient de température. *

Le saut de réactivité positif à l'instant t = 0 peut s'écrire $\rho_p = \delta k_p$

$$\rho_p = 0 \qquad \text{pour } t = 0_-$$
$$\rho_p = \delta k_p \qquad \text{pour } t = 0_+$$

De plus, au moment où $t = 0$, $n = n_o$ et $C = C_o = \frac{\beta n_o}{\lambda \theta}$

Les équations cinétiques (3-3) et (3-4) de la théorie à un seul groupe de neutrons retardés se ramènent à une seule équation du

* Références [26] et [27]

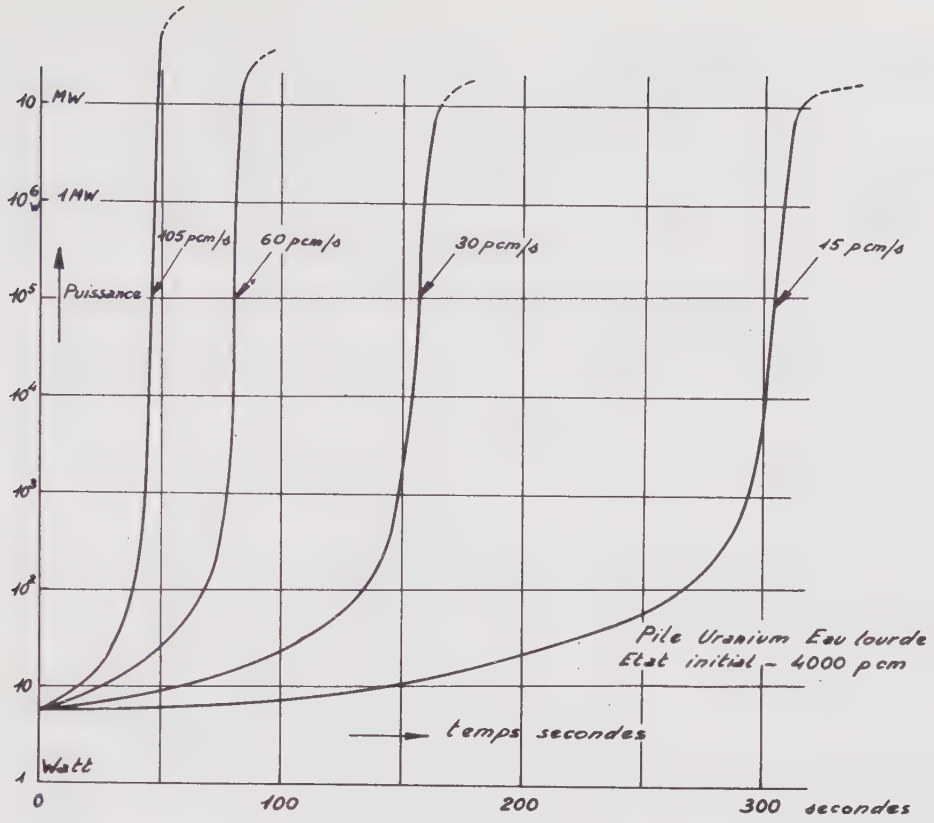


Fig : 3-11

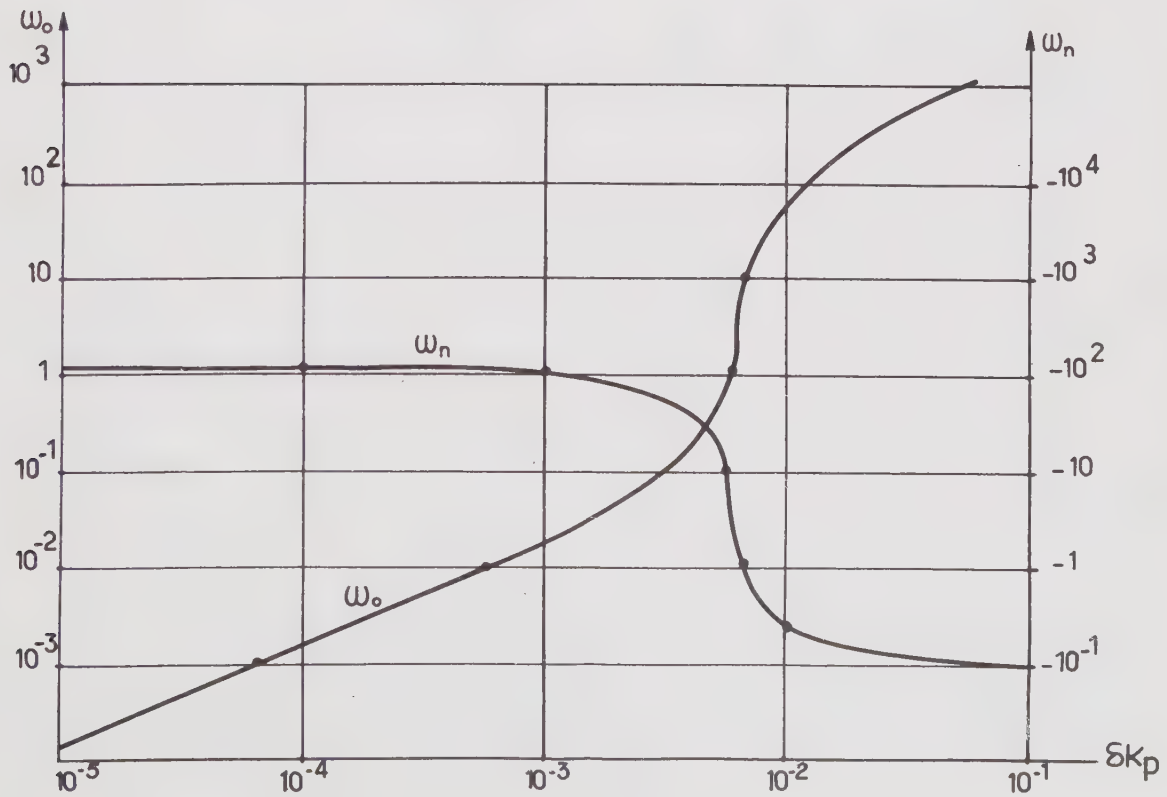


fig.: 3-12

deuxième ordre, de la forme :

$$\frac{d^2 n}{dt^2} + \frac{\beta + \lambda\theta - \delta k_p}{\theta} \frac{dn}{dt} - \frac{\lambda \delta k_p}{\theta} n = 0 \qquad (3\text{-}20)$$

dont la solution est de la forme :

$$n = A_o e^{\omega_o t} + A_n e^{\omega_n t}$$

$$C = B e^{-\lambda t} + \frac{\beta \delta k_p}{\theta (\lambda + \omega_o)} A_o e^{\omega_o t} + \frac{\beta \delta k_p}{\theta (\lambda + \omega_n)} A_n e^{\omega_n t} \qquad (3\text{-}21)$$

Les constantes A_o, A_n et B sont déterminées par les conditions initiales et ω_o, ω_n sont les racines de l'équation caractéristique

$$\omega^2 + \frac{\beta + \lambda\theta - \delta k_p}{\theta} \omega - \frac{\lambda \delta k_p}{\theta} = 0$$

$$\omega_o = \frac{\delta k_p - \beta - \lambda\theta + \sqrt{\left[\delta k_p - \beta - \lambda\theta\right]^2 + 4 \lambda\theta \delta k_p}}{2\theta} \qquad (3\text{-}22)$$

$$\omega_n = \frac{\delta k_p - \beta - \lambda\theta - \sqrt{\left[\delta k_p - \beta - \lambda\theta\right]^2 + 4 \lambda\theta \delta k_p}}{2\theta} \qquad (3\text{-}23)$$

Pour les valeurs positives de δk_p, ω_o est > 0 et $\omega_n < 0$

Pour les valeurs négatives de δk_p, ω_o est < 0 et $\omega_n < 0$

On a représenté sur la figure 3-12, les valeurs de ω_o et ω_n en fonction de $\delta k_p > 0$ et pour $\theta = 5 . 10^{-5}$ s (Valeur courante pour une pile à uranium enrichi - eau légère).

a. 1) Saut de réactivité $\delta k_p < \beta$

Lorsque $\delta k_p < \beta$, et si $\lambda\theta < \delta k_p$, n peut se mettre sous la forme :

$$n = n_o \left[\frac{\beta}{\beta - \delta k_p} e^{\frac{\delta k_p \lambda}{\beta - \delta k_p} t} - \frac{\delta k_p}{\beta - \delta k_p} e^{-\frac{\beta - \delta k_p}{\theta} t} \right] \qquad (3\text{-}24)$$

La puissance évolue avec la période stable :

$$T = \frac{\beta - \delta k_p}{\delta k_p \lambda} \qquad (3\text{-}25)$$

La contribution des neutrons retardés n'est pas négligeable.

On a en effet :

$$C = n_o \left[\frac{\beta - 1}{\lambda\theta} - \frac{\beta \delta k_p}{(\beta - \delta k_p)^2} \right] e^{-\lambda t} + \frac{n_o}{\lambda\theta} e^{\frac{\delta k_p \lambda}{\beta - \delta k_p} t} + \frac{\beta \delta k_p}{(\beta - \delta k_p)^2} n_o e^{-\frac{\beta - \delta k_p}{\theta} t} \qquad (3\text{-}26)$$

On a tracé sur la figure 3-13 l'évolution de n/n_o et C/C_o en fonction du temps pour $\delta k_p = 0,2\ \beta$ et en prenant $\beta = 640$ p. c. m.

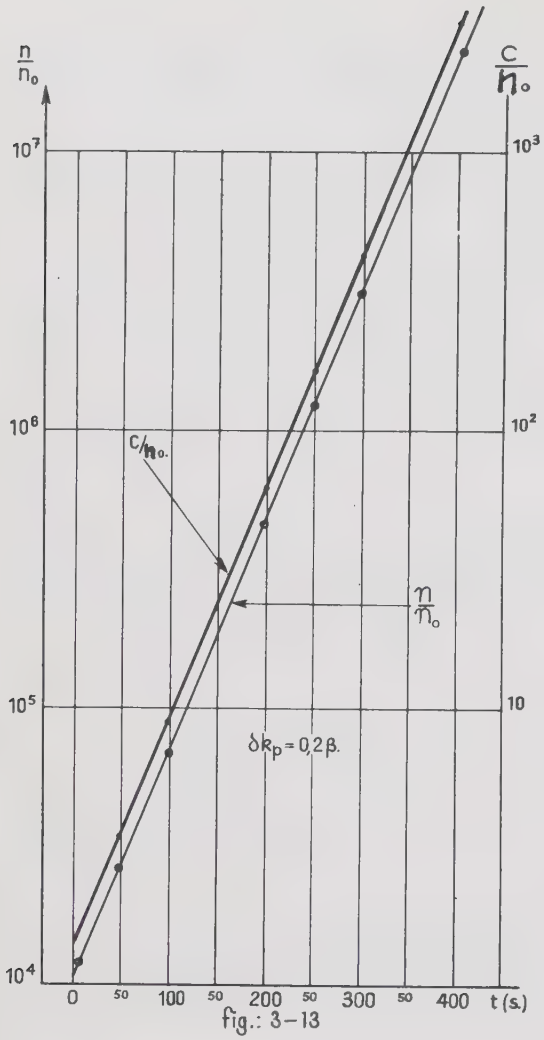


fig.: 3-13

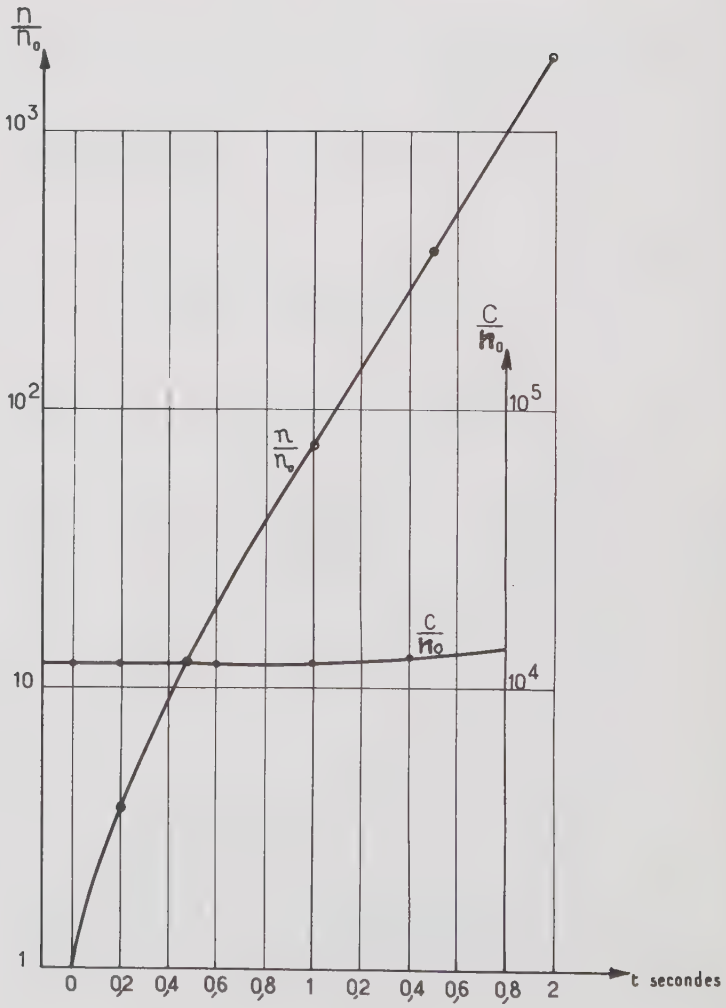


fig.: 3-14

$\theta = 10^{-3}$ s et $\lambda \simeq 7,7 \cdot 10^{-2}$ (pile à uranium naturel - eau lourde).

On remarquera que la contribution des neutrons retardés est très importante et que leur évolution est parallèle à celle de la puissance.

a. 2) Saut de réactivité $\delta k_p > \beta$

Lorsque $\delta k_p \gg \beta$, n peut se mettre sous la forme :

$$n = n_o \left[\frac{\delta k_p}{\delta k_p - \beta} \, e^{\frac{\delta k_p - \beta}{\theta} t} - \frac{\beta}{\delta k_p - \beta} \, e^{-\left(\frac{\delta k_p \lambda}{\delta k_p - \beta}\right) t} \right] \qquad (3\text{-}27)$$

si l'on suppose :

$$\delta k_p \gg \sqrt{4 \lambda \theta \, \delta k_p} \qquad (\text{voir } 3\text{-}22)$$

$$\delta k_p \gg \beta \, \delta k_p + \lambda \theta$$

La contribution des neutrons retardés est donnée par l'expression :

$$C = \frac{\beta \, \delta k_p \, n_o}{(\delta k_p - \beta)^2} \left(e^{\frac{\delta k_p - \beta}{\theta} t} - e^{-\lambda t} \right) + \frac{\beta}{\lambda \theta} \, n_o \, e^{-\frac{\lambda \, \delta k_p}{\delta k_p - \beta} t} \qquad (3\text{-}28)$$

La puissance évolue avec une période stable :

$$T = \frac{\theta}{\delta k_p - \beta} \qquad (3\text{-}29)$$

les neutrons retardés, on le voit, n'ont aucune contribution dans le calcul de cette période.

On a tracé sur la figure 3-14 les évolutions de n et C pour $\delta k_p = 1,5\,\beta$, $\theta = 10^{-3}$ s et $\lambda = 7,7 \cdot 10^{-2}$

On remarquera que dans l'évolution de la puissance, la contribution des neutrons retardés est négligeable, et qu'au début de l'excursion, C conserve une valeur à peu près constante.

On admettra que dans ce qui suit, seuls les coefficients de température interviennent dans les premiers instants de l'excursion de puissance et pour la limiter.

b) Cas du saut positif de réactivité en tenant compte du coefficient de température.

Nous supposons ici que seuls les coefficients de température interviennent dans les premiers instants de l'excursion de puissance pour la limiter. L'hypothèse essentielle consiste à négliger l'influence des neutrons retardés.* Les calculs développés ici ne sont alors valables que pour des sauts de réactivité supérieurs à β ou pour des périodes très courtes (bien inférieures à celles de la décroissance des précurseurs de neutrons retardés).

On suppose de plus qu'à la suite du saut de réactivité $\rho_o > 0$, la réactivité évolue suivant l'expression :

$$\rho = \rho_o - \alpha T_{u+m} \qquad (3\text{-}30)$$

où T est une température proportionnelle à l'énergie libérée à partir de l'instant initial ou $n = n_o$

* Référence [28]

Ce qui conduit à :

$$\frac{dT_{atm}}{dt} = K\,(n - n_o)$$

ou
$$\rho = \rho_o - \alpha K \int_o^t \left[n\,(t) - n_o \right] dt \qquad (3\text{-}31)$$

et
$$\frac{d\rho}{dt} = -\alpha K\,(n - n_o) \qquad (3\text{-}32)$$

Si l'on néglige l'influence des neutrons retardés les équations cinétiques s'écrivent :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\beta}{\theta}\,(\rho_\beta - 1)\,n \qquad (3\text{-}33)$$

dans le cas ou l'on exprime ρ_β en β (ou dollar comme disent les Anglo-saxons).

En divisant membre à membre les équations (3-32) et (3-33), on a :

$$\frac{d\rho}{dn} = -\frac{\alpha K\,(n - n_o)}{\frac{\beta}{\theta}\,(\rho_\beta - 1)\,n} \qquad (3\text{-}34)$$

L'intégration de (3-34) permet d'écrire :

$$\frac{1}{2}\left[(\rho_{\beta o} - 1)^2 - (\rho_\beta - 1)^2 \right] = \frac{\alpha K \theta}{\beta}\left[n - n_o\ L \left| \frac{n}{n_o} \right| - n_o \right] \qquad (3\text{-}35)$$

expression qui permet de lier n à ρ_β.

On constate que pour $n = n_o$ $\quad (\rho_{\beta o} - 1)^2 - (\rho_\beta - 1)^2 = 0$

d'où l'on déduit :

$$\rho_\beta = \rho_{\beta o} \quad \text{et} \quad \rho_\beta = 2 - \rho_{\beta o}$$

le maximum de la puissance a lieu pour $\frac{dn}{dt} = 0$

à cet instant $\rho_\beta = 1$ d'après (3-33).

L'équation (3-35) permet alors de calculer n_{max} à partir de l'égalité :

$$\frac{2\,\alpha K \theta}{\beta} \left[n_{max} - n_o \left(1 + L_e \frac{n_{max}}{n_o}\right) \right] = (\rho_{\beta o} - 1)^2 \qquad (3\text{-}36)$$

Dans le cas où $n_{max} \gg n_o$, on peut à partir de (3-36) calculer une expression approchée de n_{max} on a :

$$n_{max} = \frac{(\rho_{\beta o} - 1)^2}{2\,\alpha K} \frac{\beta}{\theta} + n_o \left[L_e \frac{(\rho_{\beta o} - 1)^2\,\beta}{2\,\theta\,\alpha K\, n_o} + 1 \right] \qquad (3\text{-}37)$$

La valeur de $(\rho_{\beta o} - 1)^2$ calculée à partir de (3-36) et portée dans (3-35) donne :

$$\frac{1}{2} (\rho_\beta - 1)^2 = \frac{\alpha K \theta}{\beta} \left[n_{max} - n - n_o\, L_e \left(\frac{n_{max}}{n}\right) \right] \qquad (3\text{-}38)$$

L'intégration de l'équation (3-33) donne :

$$t = \frac{\theta}{\beta} \int_{n_o}^{n} \frac{dn}{(\rho_\beta - 1)\, n} \qquad (3\text{-}39)$$

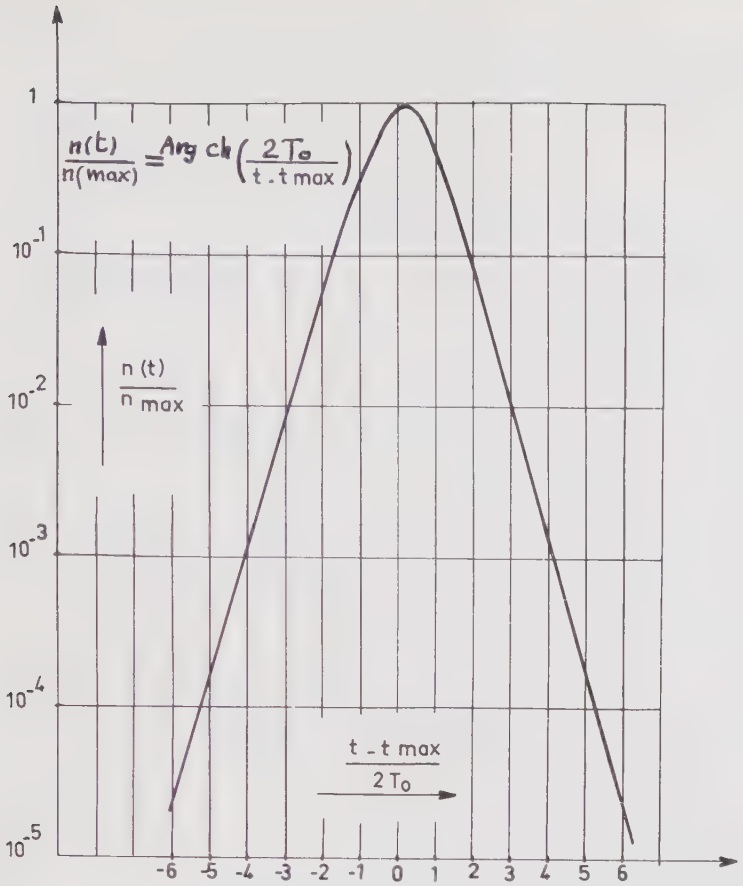


FIG.: 3-15

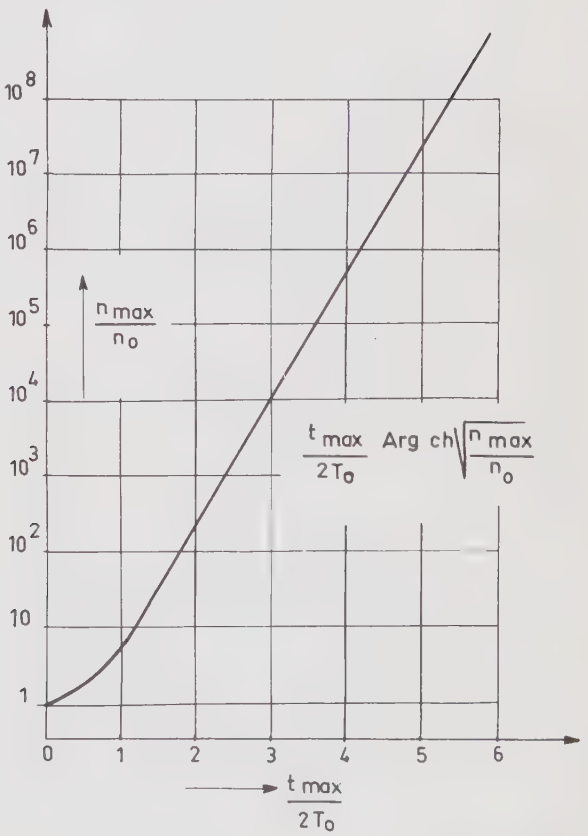


FIG.: 3-16

Dans le cas où $n_{max} \gg n_o$ l'élimination de $(\rho_\beta - 1)$ entre les équations (3-38) et (3-39) donne :

$$t = \sqrt{\frac{\theta}{2\beta n_{max} \alpha K}} \int_{n_o}^{n} \frac{dn}{n\sqrt{1 - \frac{n}{n_{max}}}} =$$

$$\frac{2\theta}{\beta(\rho_{\beta o} - 1)} \left[\text{Arg ch} \sqrt{\frac{n_{max}}{n_o}} - \text{Arg ch} \sqrt{\frac{n_{max}}{n}} \right] \quad (3\text{-}40)$$

A l'instant où $n = n_{max}$ on a $t_{max} = 2\,T_o\ \text{Arg ch} \sqrt{\frac{n_{max}}{n_o}}$

T_o étant la période asymptotique définie par $\frac{1}{T_o} = \frac{\beta}{\theta}(\rho_{\beta o} - 1)$ (3-41)

On a donc :

$$t - t_{max} = -2\,T_o\ \text{Arg ch} \sqrt{\frac{n_{max}}{n}}$$

expression qui peut se mettre sous la forme :

$$n(t) = \frac{n_{max}}{\left[\cosh\left(\frac{t - t_{max}}{2\,T_o}\right)\right]^2} \quad (3\text{-}42)$$

On a tracé sur la figure 3-15 la courbe qui donne le rapport

$$\frac{n(t)}{n_{max}} \quad \text{en fonction de} \quad \frac{t - t_{max}}{2\,T_o}$$

Pour avoir la variation de n en fonction de t, il faut connaitre n_{max} et t_{max}.

n_{max} peut le plus souvent se calculer à partir de l'expression (3-37), on a :

$$\frac{n_{max}}{n_o} = \frac{\rho_o - 1}{2\alpha K n_o T_o} + 1 + L_e \left(\frac{\rho_o - 1}{2\alpha K n_o}\right) \frac{1}{T_o} \qquad (3\text{-}43)$$

Si $\frac{n_{max}}{n_o} \geq 10^3$ on a une approximation meilleure que 1 p. 100

$$\frac{n_{max}}{n_o} = \frac{(\rho_o - 1)^2 \beta}{2 \alpha K n_o \theta}$$

La courbe de la figure 3-16 représente la variation de $\frac{t_{max}}{2 T_o}$ en fonction de n_{max} / n_o

A l'aide de la formule (3-42) il est facile de constater que le temps Δt qui sépare les deux instants où la puissance est égale à $n_{max}/2$ est :

$$\Delta t = 4 T_o \ \text{Argch} \ \sqrt{2} \quad \text{soit sensiblement}$$

$$\Delta t = 3,52 \ T_o \qquad (3\text{-}44)$$

L'énergie libérée pendant le transitoire de puissance peut être calculée à l'aide de l'égalité (3-32)

soit $$\int_o^t (n(t) - n_o)\, dt = \frac{\rho_o - \rho}{\alpha K} \qquad (3\text{-}45)$$

La durée du transitoire étant de $2\,t_{max}$ et comme $\rho_\beta(2\,t_{max}) = 2 - \rho_{\beta o}$, on en déduit :

$$E = \int_o^{2\,t_{max}} n(t)\,dt = 2\,t_{max}\,n_o + \frac{2\,(\rho_{\beta o} - 1)}{\alpha\,K} \qquad (3\text{-}46)$$

En explicitant les valeurs de t_{max} et $\rho_{\beta o}$ on a

$$E = 4\,T_o \left\{ n_{max} - n_o \left[1 + L_e \left(\frac{n_{max}}{n_o} \right) \right] - \text{Arg ch} \sqrt{\frac{n_{max}}{n_o}} \right\} \qquad (3\text{-}47)$$

soit approximativement $E = 4\,T_o\,n_{max}$

c) Cas des variations linéaires très lentes de réactivité sans tenir compte du coefficient de température.

Si l'on suppose maintenant que la réactivité varie très lentement, on peut alors faire l'approximation du premier ordre qui consiste à considérer les neutrons retardés comme partant d'un état d'équilibre ; dans ce cas *

$$\left(\frac{dC_i}{dt}\right)_{t=o} = 0 \text{ et } C_{io} = \frac{\beta_i\,n_o}{\lambda_i\,\theta} \text{ au temps } t = 0$$

Si l'on admet en plus que la variation de C_i en fonction du temps est sensiblement linéaire, ce qui conduit à poser :

$$\frac{d^2 C_i}{dt^2} \simeq 0, \text{ et au temps } t = 0 \quad \left(\frac{dn}{dt}\right)_{t=o} = 0$$

* Références [29] [30] et [31]

les équations cinétiques se ramènent à :

$$\frac{dn}{dt} = \rho \frac{n}{\bar{\theta}} + \frac{S\theta}{\bar{\theta}}$$

avec

$$\bar{\theta} = \theta + \sum_i \frac{\beta_i}{\lambda_i}$$

$\bar{\theta}$ est souvent appelé "vie moyenne virtuelle" des neutrons (en tenant compte des neutrons retardés).

La réactivité variant linéairement suivant la loi $\rho = \rho_o + at$ on peut écrire :

$$\frac{dn}{d\rho} = \rho \frac{n}{a\bar{\theta}} + S \frac{\theta}{a\bar{\theta}} \qquad (3\text{-}48)$$

Cette équation différentielle peut s'intégrer aisément en faisant le changement de variable $n = u, v$; u et v étant fonction de ρ, mais choisies de telle façon que :

$$\frac{dv}{d\rho} = \frac{\rho}{a\bar{\theta}} v$$

En tenant compte des conditions initiales d'intégration on obtient :

$$n = -\frac{\rho_o n_o}{a\bar{\theta}} e^{\frac{1}{2a\bar{\theta}}\rho^2} \int_o^{\rho} e^{-\frac{1}{2a\bar{\theta}}\rho^2} d\rho + n_o e^{\frac{1}{2a\bar{\theta}}(\rho^2 - \rho_o^2)} \qquad (3\text{-}49)$$

La puissance de divergence n_D est définie par $\rho = 0$ au temps $t = -\rho_o / a$

soit :

$$n_D = \frac{\rho_o n_o}{a\bar{\theta}} \int_o^{\rho_o} e^{-\frac{1}{2a\bar{\theta}}\rho^2} d\rho + n_o e^{-\frac{1}{2a\bar{\theta}}\rho_o^2}$$

Le développement limité de l'expression

$$\int_o^{\rho_o} e^{-\frac{1}{2a\bar{\theta}}\rho^2} d\rho$$

pour les valeurs habituelles de $\bar{\theta}$ et ρ_o, et pour a petit, conduit à :

$$\int_o^{\rho_o} e^{-\frac{1}{2a\bar{\theta}}\rho^2} d\rho = \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \frac{e^{-\frac{1}{2a\bar{\theta}}\rho_o^2}}{\sqrt{\frac{2}{a\bar{\theta}}}\,\rho_o} \right) \sqrt{2a\bar{\theta}}$$

et l'on obtient :

$$n_D = \rho_o n_o \sqrt{\frac{\pi}{2a\bar{\theta}}} = S\theta \sqrt{\frac{\pi}{2a\theta}} \qquad (3\text{-}50)$$

donc indépendante de la réactivité initiale.

La puissance de divergence n_D est fonction de $A = \frac{\rho_o n_o}{\sqrt{\bar{\theta}}}$ qui caractérise le réacteur à l'arrêt et de a, vitesse des barres

La puissance de divergence sera d'autant plus grande que la vitesse des barres sera plus faible.

Sur la figure 3-17, nous avons tracé la variation de $\left(\frac{n_1}{n_o}\right) \frac{1}{\rho_o}$

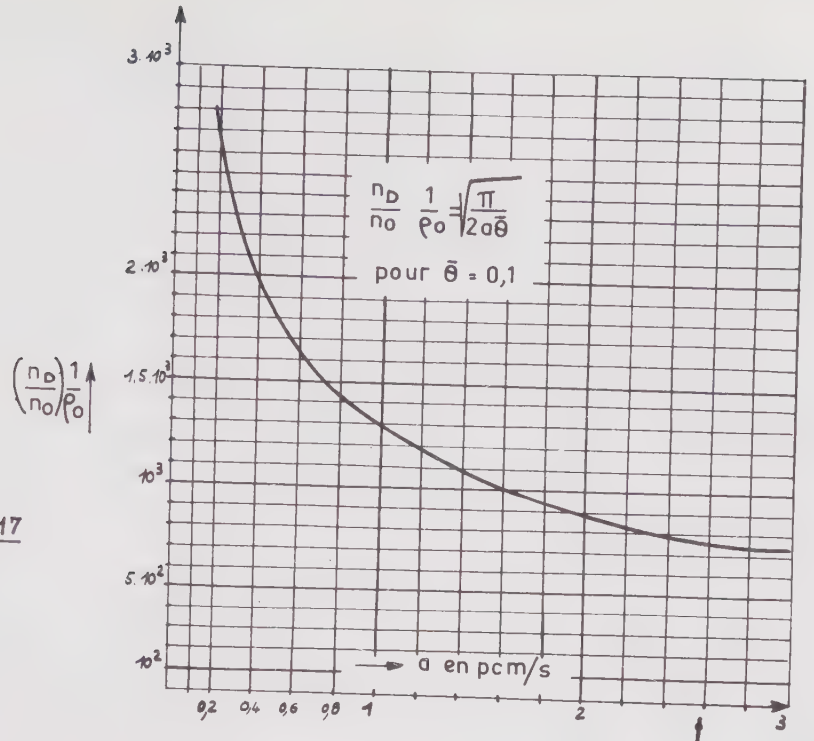


FIG. : 3-17

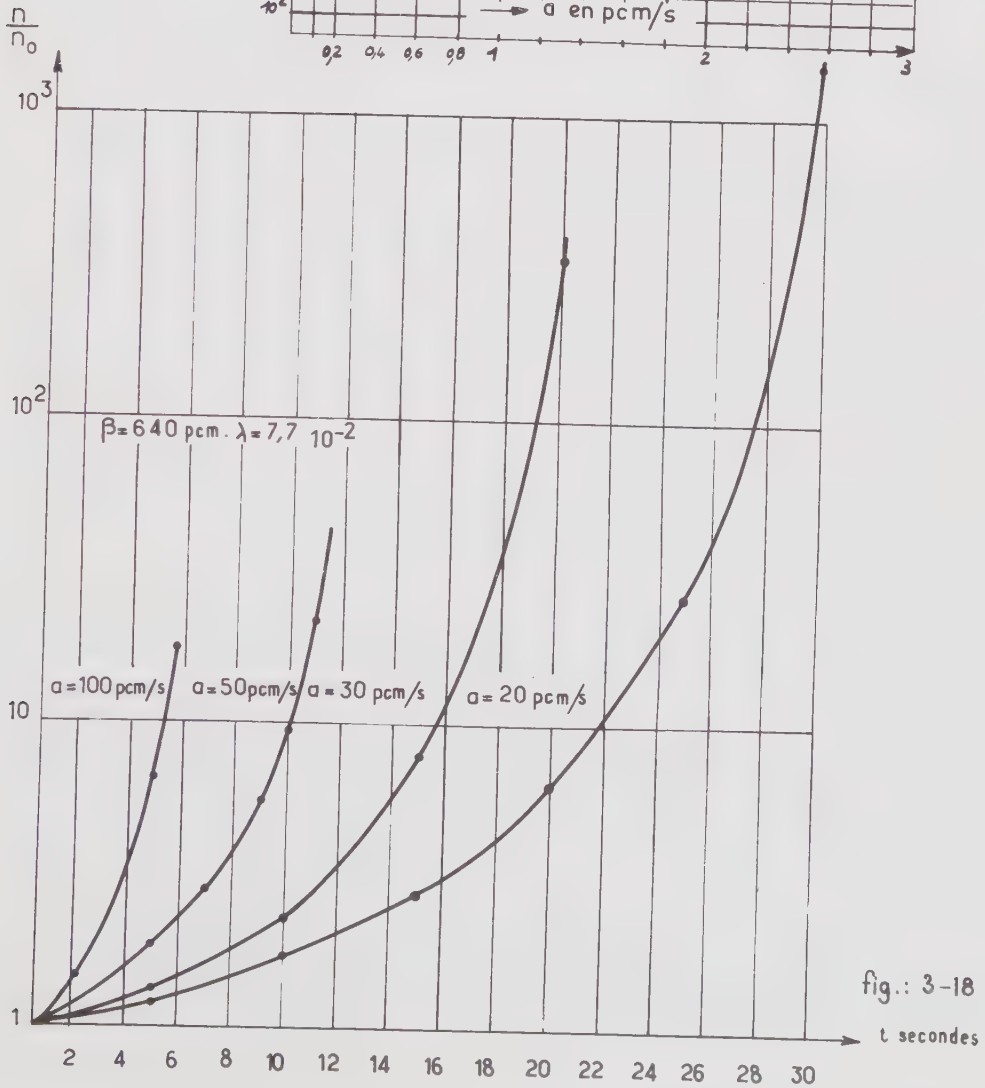


fig.: 3-18

en fonction de a pour $\bar{\theta} = 0,1$ valeur courante pour les piles à uranium modérées à l'eau lourde, à l'eau légère ou au graphite.

La période peut être calculée à chaque instant à partir de la relation (3-49). En effet :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{\frac{\rho}{a\bar{\theta}} \left[AY \left(\frac{\rho}{\sqrt{a\bar{\theta}}} \right) + B \right] + A \frac{a}{\sqrt{2\pi a\bar{\theta}}} e^{-\frac{(\rho_o + at)^2}{2}}}{AY \left(\frac{\rho}{\sqrt{a\bar{\theta}}} \right) + B} \qquad (3\text{-}51)$$

avec :

$$A = -\sqrt{\frac{2\pi}{a\bar{\theta}}}\, \rho_o \qquad \text{et} \qquad B = AY \left(-\frac{\rho_o}{a\bar{\theta}} \right) + e^{-\left(\frac{\rho_o}{\sqrt{2a\bar{\theta}}}\right)^2}$$

Y : fonction de GALTON définie par :

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_o^x e^{-x^2/2}\, dx$$

On trouve d'ailleurs que compte tenu des hypothèses faites la période à la divergence se met sous la forme

$$1/T_D = \sqrt{2a/\pi\bar{\theta}}$$

On constate ainsi qu'elle est indépendante des conditions initiales.

d) Cas des variations linéaires rapides de réactivité sans tenir compte du coefficient de température.

En prenant pour origine des temps $t = 0$ l'instant où $n = n_{pc}$, les équations cinétiques s'écrivent :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{at}{\theta}\, n + \sum_{i=1}^{i=m} \lambda_i C_i + S$$

En supposant que $\sum_{i=1}^{i=m} \lambda_i C_i + S$ = constante à partir de t = 0, on a :

$$\frac{1}{n_{pc}} \cdot \frac{dn_{pc}}{dt} \cdot n_{pc} = \frac{\beta}{\theta}\, n_o$$

c'est-à-dire :

$$\frac{\beta}{\theta}\, n_o = \sum_{i=1}^{i=m} \lambda_i C_i + S$$

On est alors conduit à l'équation :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{at}{\theta}\, n + \frac{\beta}{\theta}\, n_o$$

dont l'intégration est immédiate :

$$n = e^{\frac{at^2}{2\theta}} \left[n_{pc} + \frac{\beta}{\theta}\, n_o \int_o^t e^{-\frac{at^2}{2\theta}}\, dt \right] \qquad (3\text{-}52)$$

En tenant compte de la valeur de n_{pc}, on obtient finalement :

$$\frac{n}{n_o} = \beta\, e^{\frac{at^2}{2\theta}} \left[\sqrt{\frac{\pi}{2a\theta}} + \frac{1}{\theta} \int_o^t e^{-\frac{at^2}{2\theta}}\, dt \right] \qquad (3\text{-}53)$$

Les courbes d'évolution de puissance indiquées sur la figure 3-18.

correspondent à différentes vitesses de barres pour $\theta = 10^{-3}$ s et $\theta = 10^{-5}$ s.

Remarque :

Dans certains cas les équations cinétiques à un seul groupe de neutrons retardés peuvent s'intégrer facilement.

En effet, en négligeant l'influence des sources elles peuvent s'écrire :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\theta} n + \lambda c \qquad (3\text{-}54)$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\beta}{\theta} n - \lambda c \qquad (3\text{-}55)$$

Ces deux équations peuvent se mettre sous la forme :

$$\frac{d^2 n}{dt^2} + (\gamma + \lambda - \delta) \frac{dn}{dt} - (\lambda \delta + \delta') n = 0 \qquad (3\text{-}56)$$

à oondition de poser :

$$\gamma = \frac{\beta}{\theta} \qquad \delta = \frac{\rho}{\theta} \qquad \delta' = \frac{1}{\theta} \frac{d\rho}{dt}$$

Si l'on suppose $p = \gamma + \lambda - \delta$ et $q = -(\lambda \delta + \delta')$, l'équation (3-56) peut se mettre sous la forme

$$\frac{d^2 n}{dt^2} + p \frac{dn}{dt} + qn = 0 \qquad (3\text{-}57)$$

Cette équation admet pour solution

$$n = v\, e^{-\frac{1}{2}\int p\, dt}$$

où v est solution de l'équation différentielle

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \left(q - \frac{p^2}{4} - \frac{1}{2}\frac{dp}{dt}\right) v = 0$$

ou encore en explicitant p et q

$$\frac{d^2v}{dt^2} = \frac{1}{4}\left[(r+\lambda)^2 - 2(r-\lambda) + \beta^2 + 2\beta'\right] v \qquad (3\text{-}58)$$

(3-58) est de la forme $\frac{d^2y}{dx^2} = -F(x).y$ et a pour solution

$$y = \left[F(x)\right]^{-1/4} . J \quad \text{à condition que } J \text{ satisfasse l'égalité}$$

$$\frac{d^2J}{dU^2} = -\left[1 - \frac{1}{16}\left(\frac{1}{F}\frac{dF}{dU}\right)^2 - \frac{1}{4}\frac{d}{dU}\left(\frac{1}{F}\frac{dF}{dU}\right)\right] J =$$

$$-\left[1 + \frac{5}{16}F^3\left(\frac{dF}{dx}\right)^2 - \frac{1}{4F^2}\frac{d^2F}{dx^2}\right] J \qquad (3\text{-}59)$$

avec $U = \int_0^x \sqrt{F(x)}\, dx$

On a alors :

$$y = \frac{A \pm}{\left[F(x)\right]^{1/4}}\, e^{\pm j \int \sqrt{F(x)}\, dx} \qquad (3\text{-}60)$$

et pour solution de l'équation (3-56)

$$n = \frac{e^{-\frac{1}{2}(\tau+\lambda)t+\frac{1}{2}\int\Delta\,dt}}{[F(t)]^{1/4}}\left[A_+ e^{j\int\sqrt{F(t)}\,dt} + A_- e^{-j\int\sqrt{F(t)}\,dt}\right] \quad (3\text{-}61)$$

A_+ et A_- constantes déterminées par les conditions initiales.

Dans le cas d'une évolution linéaire ou exponentielle de la réactivité, G.W. RODEBACK* a explicité la formule (3-61) lorsqu'à l'instant initial la pile est critique.

C'est ainsi que pour $\rho = at$ avec pour $t = 0$ $n = n_o$ $\frac{dn}{dt} = 0$, l'expression calculée de n est :

$$n = n_o\, e^{-\frac{1}{2}(\tau+\lambda)t+\frac{t^2}{4}m}\left(\frac{V_o}{V}\right)^{1/4}$$

$$\left\{\left(\frac{1}{2} - \frac{Q}{2\sqrt{V_o}}\right) e^{\tau_1} + \left(\frac{1}{2} + \frac{Q}{2\sqrt{V_o}}\right) e^{\tau_2}\right\} \quad (3\text{-}62)$$

avec $m = \frac{a}{\theta}$

$$V = \frac{4\lambda\tau + 2m + (mt - \tau + \lambda)^2}{4}$$

$$V_o = \frac{2m + (\lambda+\tau)^2}{4}$$

$$\frac{Q}{2\sqrt{V_o}} = \frac{\frac{1}{2}(\tau+\lambda) - \frac{m}{8}(\tau-\lambda)\frac{1}{V_o}}{2\sqrt{V_o}}$$

$$\tau_1 = -\frac{t}{2}\sqrt{V} - \frac{\tau-\lambda}{2m}(\sqrt{V} - \sqrt{V_o}) - (\frac{\tau\lambda}{m} + \frac{1}{2})\, L_e \frac{mt - \tau + \lambda + 2\sqrt{V}}{\lambda - \tau + 2\sqrt{V_o}}$$

* Référence [32]

$$\tau_2 = +\frac{t}{2}\sqrt{V} + \frac{\tau - \lambda}{2m}\left(\sqrt{V} - \sqrt{V_o}\right) + \left(\frac{\tau\lambda}{m} + \frac{1}{2}\right) L_e \frac{mt - \tau + \lambda + 2\sqrt{V}}{\lambda - \tau + 2\sqrt{V_o}}$$

e) Calcul de l'énergie totale libérée dans le cas d'apparition d'une réactivité négative variant linéairement avec l'énergie développée.

Si l'on suppose que lors d'un incident lié à un saut de réactivité, les barres de sécurité ne fonctionneront pas, on aura intérêt à prédéterminer l'énergie libérée, mais le calcul est complexe car il dépend des coefficients de température, de la thermodynamique et de la thermique de la pile.

On fera ici l'hypothèse que la réduction de réactivité pendant l'excursion de puissance est, à tout instant, une fonction linéaire de la puissance. On suppose en plus, que cette réduction ne se fait sentir qu'à partir d'une énergie libérée E_o.*

En désignant par P la puissance de la pile à l'instant t :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{\theta} P + \sum \lambda_i C_i \qquad (3\text{-}63)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\theta} P - \lambda_i C_i \qquad (3\text{-}64)$$

avec $\frac{d\,\delta k}{dt} = 0$ pour $t < t_o$ et $\frac{d\,\delta k}{dt} = -\alpha k P$ pour $t > t_o$

Si l'on pose :

* Référence [33]

$$H = \frac{\theta}{\beta} P + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\theta}{\beta_i} C_i$$

on aura :

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\delta k}{\beta} P$$

Puisque pour $t < t_o$, δk est une constante, on a :

$$H_{t_o} = \frac{\delta k_o}{\beta} \int_o^{t_o} P \, dt = \frac{\delta k_o}{\beta} E_o$$

Pour $t > t_o$, $\frac{dH}{d\,\delta k} = - \frac{\delta k}{\beta \alpha k}$, on aura :

$$H = \left(\frac{\delta k_o^2}{2} - \frac{\delta k^2}{2} \right) \cdot \frac{1}{\alpha k \beta} + E_o \frac{\delta k_o}{\beta}$$

Lorsque t augmente indéfiniment, P et C_i tendent vers zéro et H aussi, ce qui fait que lorsque t tend vers l'infini :

$$\delta k = - \sqrt{\delta k_o (\delta k_o + 2 \alpha k E_o)} \qquad (3\text{-}65)$$

On obtient alors, pour expression de l'énergie pendant l'excursion :

$$\int_o^{\infty} P \, dt = E_o + \frac{\delta k_o}{\alpha k} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \alpha k E_o}{\delta k_o}} \right) \qquad (3\text{-}66)$$

Application :

Cas d'une pile uranium enrichi - eau légère (type Mélusine)

On admettra comme coefficient de température : 8 p. c. m /°C En supposant que la piscine ait une masse d'eau de 20 m^3, que le système réfrigérant soit arrêté, et en désignant par ΔT_m l'élévation de température de l'eau, on aura :

$$\Delta T_m = \frac{P.\,t.\,864}{2\,10^4\,.\,3{,}6\,10^3} \qquad \text{ou} \qquad \frac{d\,\delta k}{dt} = \alpha k P$$

avec $\alpha k = 9{,}6\,.\,10^{-10}/kW^{-1}\,.\,s^{-1}$

P est exprimé ici en kW et t en seconde (on néglige les pertes).

En partant d'un fonctionnement de la pile à basse puissance, de l'ordre de quelques watts, avec une température d'eau égale à 15 °C, et comme le coefficient de température commence à jouer à 18 °C, on pourra déterminer

$$E_o = \frac{3\,.\,2\,.\,10^4}{864} = 69{,}4 \text{ kW h}$$

Pour un accident entraînant δk_o = 500 p. c. m, la relation (3-65) donne $\delta k \simeq 500$ p. c. m.

L'application de la formule (3-66) donne finalement :

$$\int_o^\infty P\,dt = 69{,}4 + 2\,970 = 3\,140 \text{ kW h}$$

à condition bien entendu que les barres de sécurité soient ramenées à l'intérieur.

du coeur de pile pour éviter une nouvelle excursion de puissance.

Un cas important est celui où l'on suppose une variation accidentelle assez rapide de réactivité, supérieure à β, et $E_o = 0$, de façon que simultanément, pendant la naissance de cette variation de réactivité, l'énergie libérée produise une réactivité négative égale à $\delta k_o - \beta$.

On désigne par t_1 l'instant ou l'on a

$$\delta k_o - (\delta k_o - \beta) = \beta \tag{3-67}$$

avec toujours

$$\frac{d\,\delta k}{dt} = - \gamma P$$

et
$$\int_o^{t_1} P\,dt = - \frac{1}{\gamma} \int_o^{t_1} \frac{d\,\delta k}{dt} = \frac{\delta k_o - \beta}{\gamma} \tag{3-68}$$

De $t = 0$ à $t = t_1$, $\delta k \simeq \beta$, $\frac{dH}{dt} = \frac{\delta k}{\beta} P$

d'où
$$H_{t_1} - H_{t_o} = \frac{\delta k_o - \beta}{\gamma} \tag{3-69}$$

A partir de t_1, on a : $\frac{dH}{d\,\delta k} = - \frac{\delta k}{\beta \gamma}$ (3-70)

ce qui donne pour expression globale de H

$$H = \frac{1}{2\beta\alpha k}(\beta^2 - \delta k^2) + \frac{1}{\alpha k}(\delta k_o - \beta)$$

A la limite pour $t = \infty$, $H = 0$ et $\delta k_\infty = -\beta \sqrt{\frac{2\,\delta k_o}{\beta} - 1}$

L'énergie totale libérée pendant l'excursion est

$$E = \int_o^\infty P\,dt = -\frac{1}{\alpha k}(\delta k_\infty - \delta k_o)$$

ce qui conduit à :

$$E = \frac{1}{\alpha k}\left[\delta k_o + \beta \sqrt{\frac{2\,\delta k_o}{\beta} - 1}\right] \qquad (3\text{-}71)$$

On peut ainsi déterminer l'énergie libérée pendant l'excursion de puissance et la réactivité négative produite lors d'un saut brusque de réactivité, à condition de supposer, bien entendu, qu'à n'importe quel moment de l'excursion, la pile ne soit pas critique en neutrons prompts.

Dans l'exemple précédent, si $E_o = 0$ (température de la piscine à 18°C), on aura pour $\delta k_o = 2\,000$ p.c.m ; $\delta k = 1\,470$ p.c.m (d'après 3-67).

E, calculé d'après (3-71) vaudrait 10 MWh environ.

3.4. Résultats de certaines expériences en vraie grandeur.

Les résultats de ces expériences concernent surtout des piles à eau du type bouillant ou pressurisé installées aux U.S.A.

La série des BORAX (Boiling - Reactor - Experiment) se trouve à ARCO (Etat Ihado). *

BORAX I : (modérateur et réflecteur à eau légère). Construite en 1953, cette pile a été détruite volontairement en 1954 au cours d'une expérience mémorable : on réalisa une divergence extrêmement rapide en libérant une réactivité positive de 2 000 p. c. m. La puissance crut avec une période de 0, 005 seconde jusqu'à 1 800 000 kW en un dixième de seconde, mais le modérateur ayant été volatilisé instantanément, la réaction en chaîne fut stoppée sans que de graves dégâts aient été commis.

BORAX II et BORAX III : sont des piles du même type plus puissantes, 6 MW et 15 MW (3, 5 MW électrique) ; elles fonctionnent respectivement à 36 kg / cm^2 et 35 kg / cm^2 de pression. Elles sont surtout destinées à étudier les problèmes de stabilité vis-à-vis des fluctuations de puissance. On sait en effet que l'ébullition du modérateur, pas toujours très régulière, provoque des perturbations dans la formation de vapeur, qui réagissent immédiatement sur la réactivité et la puissance.

BORAX IV : est une pile destinée surtout à étudier le comportement du combustible : l'oxyde d'uranium qui doit y être utilisé.

En dehors du programme des BORAX, des études sont faites près de Los Angelès sur la pile K. E. W. B. (Kinetic Experiments On Water Boilers). C'est une pile homogène modérée à l'eau. Son réflecteur est en graphite et sa puissance nominale est de l'ordre de 50 kW.

Les piles du type pressurisé font partie de la "SPERT SERIE"

* Référence [34]

Spécial Power reactor, excursions tests ; elles sont surtout étudiées par l'AEC et la "Phillips Petroleum Company" au "National Reactor Testing station". *

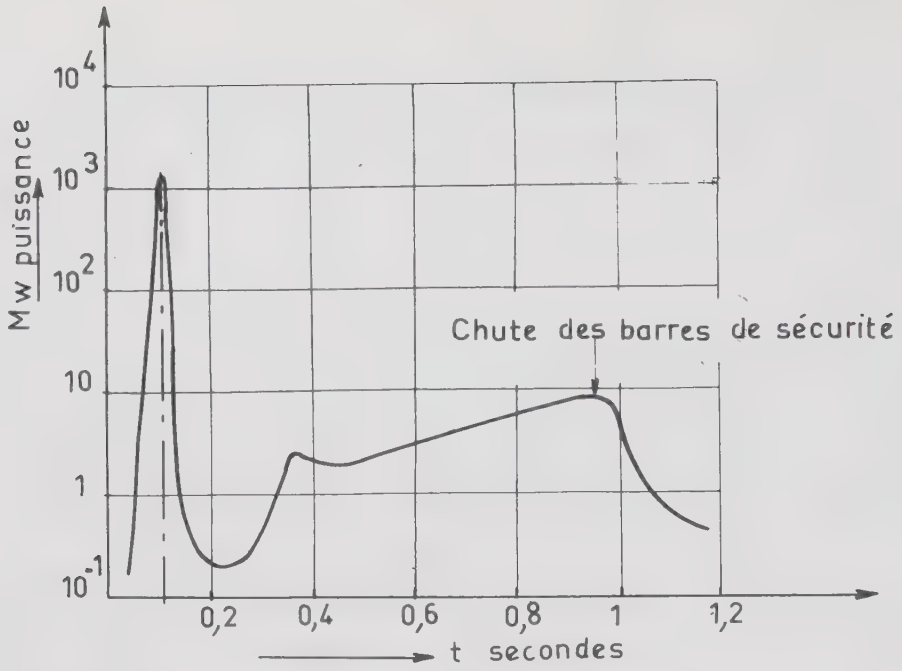
SPERT I est une pile modérée à l'eau légère non pressurisée, dont les éléments combustibles sont du type MTR modifiés. En fonctionnement depuis la fin 1955, elle a permis déjà de faire de nombreuses études de stabilité de fonctionnement et d'oscillations de puissance.

Au cours d'une expérience avec un saut de réactivité de 1 100 p. c. m. et une période de 16 millisecondes, la puissance a atteint la valeur de 300 MW en 0, 17 seconde, puis est descendue à 1, 5 MW plus rapidement pour atteindre ensuite lentement la valeur de 4 MW en 0, 3 seconde. La pile s'est très bien comportée, la température de l'eau est montée à un maximum de 250°C en 0, 18 seconde puis a décru lentement jusqu'à 100°C. La pression n'est montée que de 0, 5 kg / cm^2 après le pic de puissance.

L'influence de la température a été mesurée de 20 à 90°C La variation de réactivité est de 1 000 p. c. m. entre 20 et 95°C. Le coefficient de température évolue de - 8, 5 p. c. m. / °C (30°C) à - 20 p. c. m. / °C (95°C). La mesure de l'effet de vide du modérateur pour un coeur donné a été de - 200 p. c. m. pour 1 p. 100 de vide soit sensiblement - 0, 35 p. c. m. / cm^3. Pour les premiers centimètres de réflecteur, on a - 0, 069 p. c. m. / cm^3.

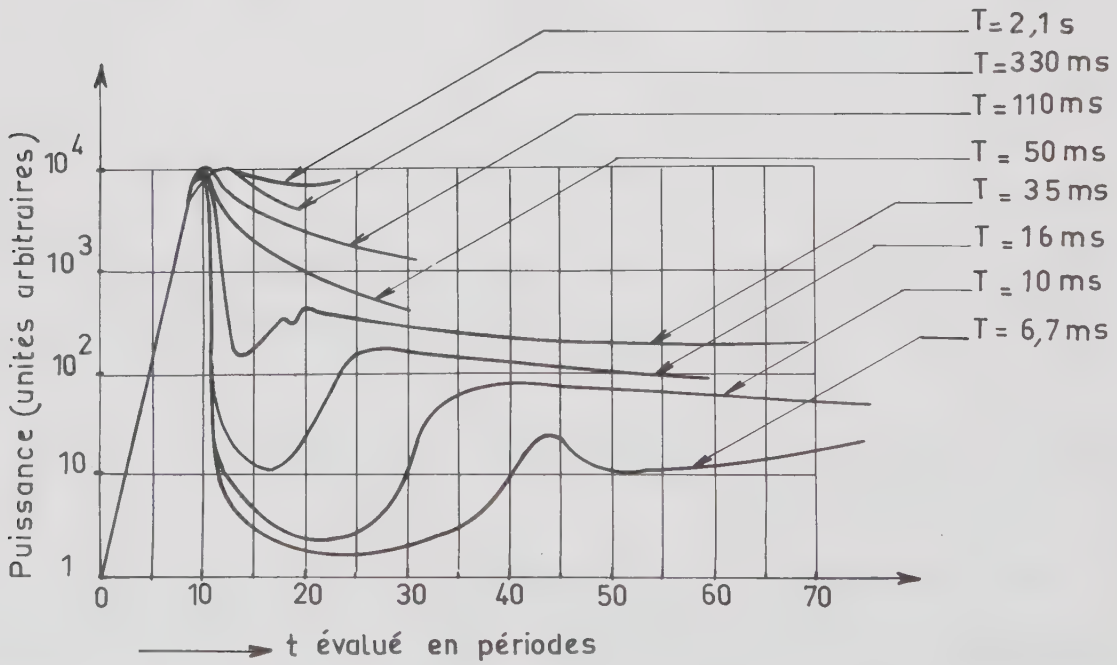
La courbe de la figure 3-19 représente une évolution de puissance enregistrée sur la pile SPERT I, après un saut de réactivité de 1 400 p. c. m.

* Références [35] et [36]



Evolution de la puissance de la pile SPERT I
aprés un saut de réactivité de 1400 pcm

FIG.: 3-19



Evolutions de puissance de la pile SPERT pour diverses periodes initiales

FIG.: 3-20

Les courbes de la figure 3-20 représentent des enregistrements d'évolution de puissance effectués sur la pile SPERT I pour diverses périodes initiales.

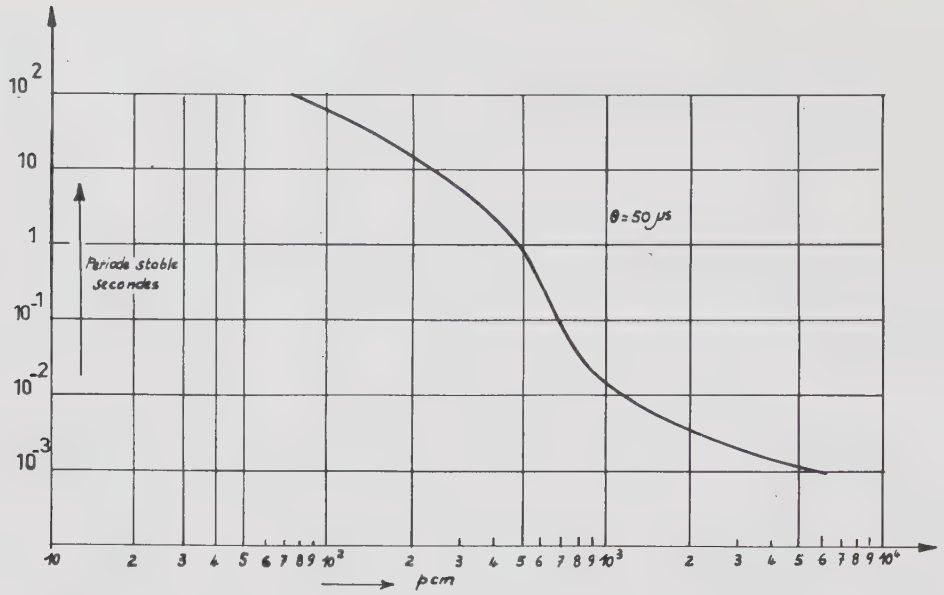
La courbe de la figure 3-21 représente la variation de la période stable en fonction de l'excès de réactivité dans le cas de différentes évolutions de la pile.

SPERT II : Pile modérée à l'eau légère pressurisée à 21 kg / cm^2 et 214 °C en fonctionnement depuis la fin de 1957. Elle doit servir à étudier l'influence de modérateurs et de réflecteurs variés : H_2O - D_2O, Be, C sur le temps de vie des neutrons prompts ; l'évolution des transitoires avec la pression maximum ainsi que les variations de pression et d'énergie libérée. Les calories produites dans la pile ne sont pas récupérées; il n'y a pas d'échangeur et la vapeur produite est envoyée dans l'atmosphère.

SPERT III : doit être une pile modérée à l'eau légère pressurisée à 175 kg / cm^2 et 450°C de forte puissance. Elle doit être pourvue de 2 échangeurs de 30 MW dont le secondaire évacuera la vapeur produite à l'air libre.

Elle doit servir à étudier : les transitoires de puissance, pression, etc... lors d'une chute rapide et brusque de la température du modérateur, le démarrage en aveugle sans appareil de mesure nucléaire dans le domaine sous critique, les transitoires de puissance lors de sauts de réactivité importants, les coefficients de vide et de température.

Depuis 1957, la "General Electric" a en cours de développe-



Periode stable en fonction de l'excès de réactivité pour différentes évolutions de puissance de la pile SPERT I

FIG.: 3-21

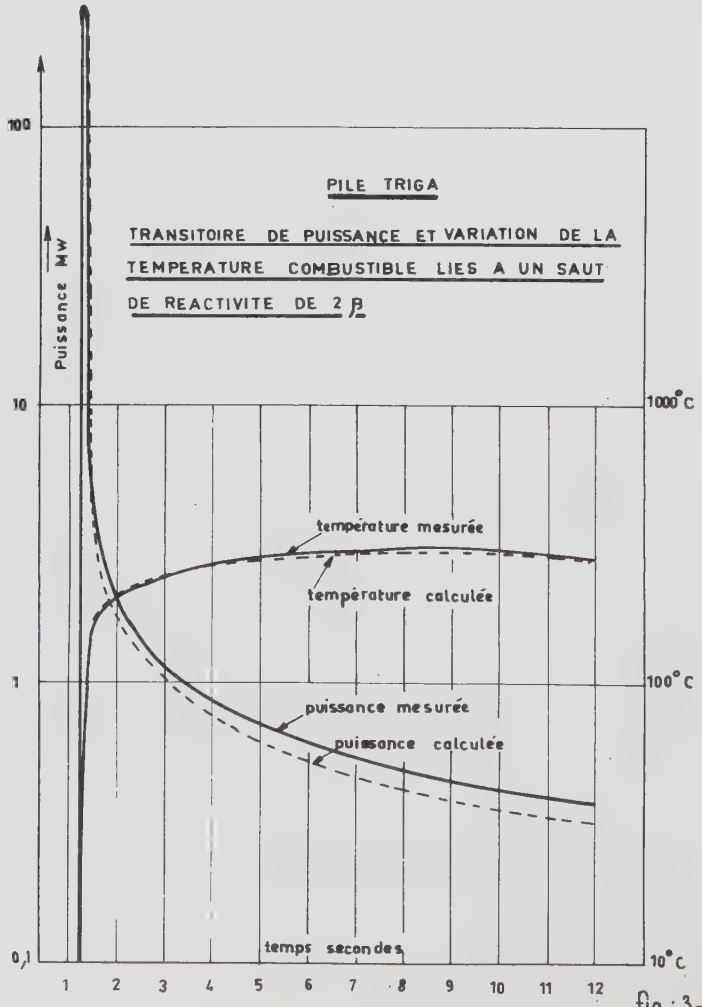


fig.: 3-22

ment, près de San Diego (Californie) une série de petites piles destinées en première étape à l'étude des effets des transitoires et des bursts de puissance sur l'appareillage de contrôle et de sécurité des piles atomiques.

Le combustible utilisé est un mélange homogène d'hydrure de zirconium et d'uranium enrichi à 20 p. 100. Le coefficient rapide de température du modérateur est très important et sa constante de temps très faible. Sur la pile "TRIGA" qui utilise des coeurs faits de ce combustible, il est possible de réaliser des insertions de réactivité de l'ordre de 800 p. c. m. / seconde.*

La figure 3-22 représente l'évolution de la puissance et de la température du combustible à la suite de l'insertion très rapide dans la pile d'une réactivité de l'ordre de 2β.

Nous indiquons dans le tableau ci-dessous les caractéristiques des bursts de puissance réalisés sur la pile à la suite d'insertions de réactivité très importantes.

Saut de réactivité (p. c. m)	1 600	2 400
Durée du burst de puissance (10^{-3} s)	40	15
Energie libérée pendant le burst de puissance (MW s)	10	20
Puissance maximum (MW)	250	1 300

* Références [37] et [38]

Flux maximum en neutrons thermiques (n / cm^2 / s^{-1})	10^{14}	5 10^{14}
Flux maximum en neutrons rapides (n / cm^2 / s^{-1})	2,5 10^{14}	1,3 10^{15}
Rayonnement γ maximum (r / h)		10^{10}

De nombreuses expériences sont prévues pour permettre d'évaluer la sécurité des réacteurs homogènes. On sait que, dans le coeur, des gaz sont libérés par radiolyse. Ces gaz peuvent avoir sur la réactivité un effet supérieur à l'effet de température. Cependant, ils demeurent néanmoins dangereux, car l'oxygène et l'hydrogène en présence peuvent constituer un mélange détonnant. La recombinaison de ces gaz doit être faite pour éviter tout risque d'explosion.

Des études de transitoires de puissance lors d'insertion rapide de réactivité se poursuivent. De nombreux paramètres doivent être mesurés : coefficient de vide, coefficient de température, influence de la pression, etc.....

Malheureusement les théories ne sont pas encore toujours bien établies particulièrement celles des pics d'excursions de puissance. L'importance relative de l'effet de température et de l'effet de vide dans la zone de fonctionnement des périodes courtes est mal connue.

Différents auteurs et en particulier H. C. CORBEN et W. A. HORNING* ont essayé d'interpréter les expériences précédentes. Leurs calculs sont intéressants car ils peuvent être étendus dans certains cas aux piles du type uranium enrichi eau légère.

* Références [39] et [40]

a) Détermination de paramètres définissant l'excursion de puissance dans le cas d'apparition d'une réactivité négative fonction de l'énergie libérée.

On suppose qu'au temps t = 0 se produise un saut de réactivité δk_o positif, et qu'avant ce temps origine, il y avait équilibre neutronique c'est-à-dire :

$$\frac{dC_i}{dt} = 0 \quad , \quad k_{eff} = 1 \quad \text{et} \quad n = n_o$$

A partir de t = 0, la puissance neutronique évolue très rapidement avec une période T calculable par la formule de NORDHEIM :

$$\delta k_o = \frac{\theta}{T} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T} \qquad (3\text{-}72)$$

Si l'on ne tient pas compte des effets de température et de géométrie, la puissance évolue suivant la loi :

$$n = n_o \, e^{\frac{t}{T}} \qquad (3\text{-}73)$$

Mais en tenant compte de ces effets et en admettant que les coefficients de température sont fonction de l'énergie libérée, on pourra alors décrire l'évolution de la réactivité par :

$$\delta k = \delta k_o - \int_o^t \mathcal{J}(t - t') \, n(t') \, dt' \qquad (3\text{-}74)$$

et si l'on pose $t - t' = W$ avec $n = n_o \, e^{\frac{t}{T}}$ on obtient :

$$\delta k = \delta k_o - n_o \, e^{\frac{t}{T}} \int_o^t \mathcal{J}(W) \, e^{-\frac{n}{T}} \, dW \qquad (3\text{-}75)$$

Si la période T est courte, la valeur de l'intégrale est indépendante de sa limite et l'on peut alors faire l'approximation

$$\delta k = \delta k_o - \delta k_1 \, e^{\frac{t}{T}} \qquad (3\text{-}76)$$

(δk_1 étant une constante beaucoup plus petite que δk_o) et écrire n sous la forme

$$n = n_o \, e^{\frac{t}{T}} - n_1 \, e^{\frac{2t}{T}} \qquad \text{avec} \quad n_1 \ll n_o \qquad (3\text{-}77)$$

Dès lors il est possible, à partir de cette égalité de déterminer :

n_M : la puissance maximum atteinte au cours de l'excursion

$E(n_M)$: l'énergie libérée pendant l'excursion de puissance, jusqu'au pic de puissance,

t_M : le temps correspondant à n_M

E_{tot} : l'énergie totale libérée pendant l'excursion de puissance.

On aura immédiatement :

$$n_M = \frac{1}{2} \, n_o \, e^{\frac{t_M}{T}} \qquad (3\text{-}78)$$

et déterminer ainsi n_M si l'on connaît t_M et n_o.

L'expression (3-77) conduit à :

$$E(n_M) = T\left[n_o \, e^{\frac{t_M}{T}} - \frac{1}{2} n_1 \, e^{(\frac{t_M}{T})^2} \right] = \frac{3}{2} T n_M \qquad (3\text{-}79)$$

ou encore :

$$T \cdot n_M = \frac{2}{3} E(n_M) \qquad (3\text{-}80)$$

L'énergie totale libérée pendant l'excursion de puissance, si celle-ci est très importante, est celle libérée jusqu'au temps t_o défini par

$$e^{\frac{t_o}{T}} = \frac{n_o}{n_1}$$

ce qui conduit finalement à :

$$E_{tot} = 2 T n_M \qquad (3\text{-}81)$$

Si d'autre part t_1 et t_2 sont les temps pour lesquels la puissance maximum est réduite dans un rapport ℓ, on aura, en posant

$x_1 = e^{\frac{t_1}{T}}$; $x_2 = e^{\frac{t_2}{T}}$:

$$n_1 x^2 - n_o x + \frac{n_M}{p} = 0$$

et

$$\delta t = t_2 - t_1 = T \log \left[\frac{1 + \sqrt{1 - \frac{1}{\ell}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\ell}}} \right] \qquad (3\text{-}82)$$

Pour p = 2, on a

$$\delta t = T \text{ Log } \left(\frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2} - 1} \right) = 1,76 \ T \qquad (3\text{-}83)$$

CORBEN a appliqué ces formules et les a comparées aux transitoires de puissance réels enregistrés sur les piles expérimentales SPERT, BORAX, BEPO et GODIVA.

Les résultats de ces comparaisons sont indiquées figures 3-23, 3-24 et 3-25, ainsi que dans le tableau 3-26.

TABLEAU 3-26

PILE	SPERT I	SPERT II	K. E. W. B.	K. E. W. B.	BEPO	GODIVA
Période d'excursions (ms)	12	100	1,97	5,11	28 000	0,09
n_M mesuré	520	13,3	550	128	6,8	$2,6 \cdot 10^{18}$ fissions / s
n_M calculé	400	13	580	118	15	$3 \cdot 10^{18}$ fissions / s

Les résultats obtenus par CORBEN peuvent être étendus aux piles du type uranium enrichi - eau légère.

L'application des relations (3-79) et (3-80) pour calculer les

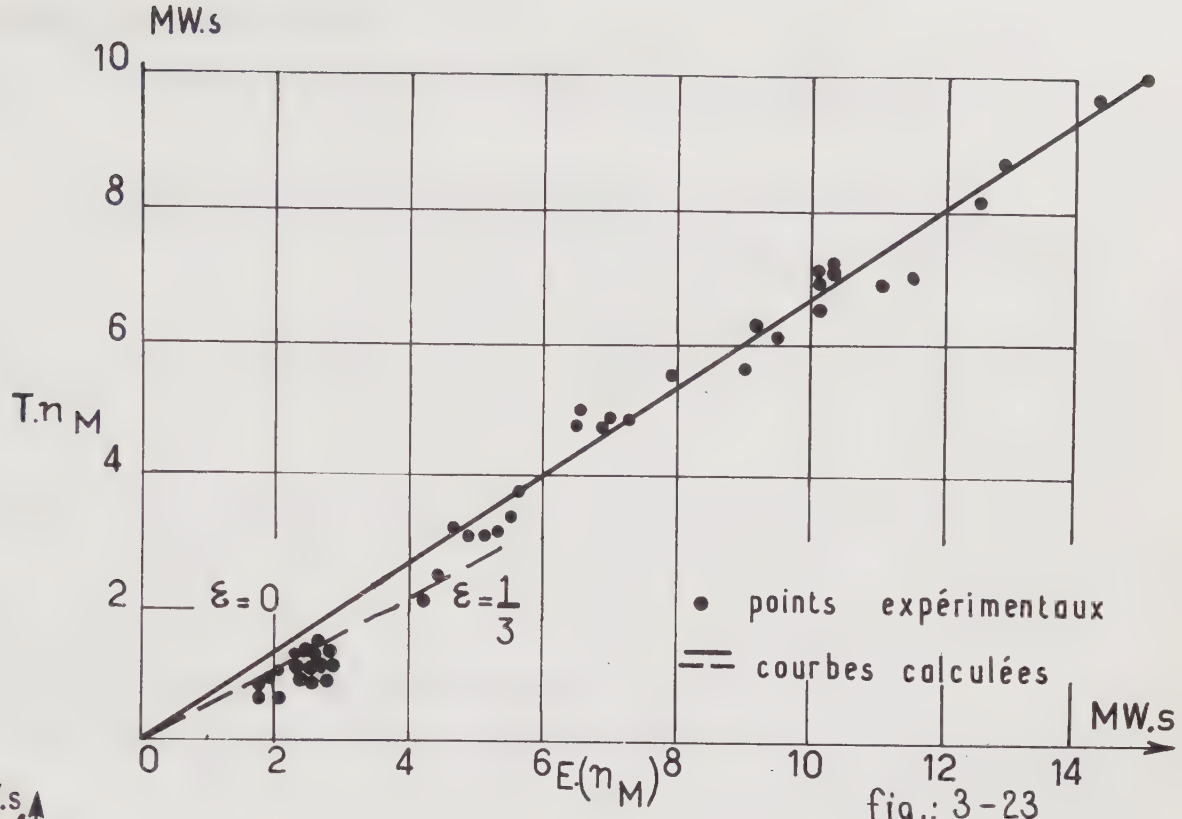


fig.: 3-23

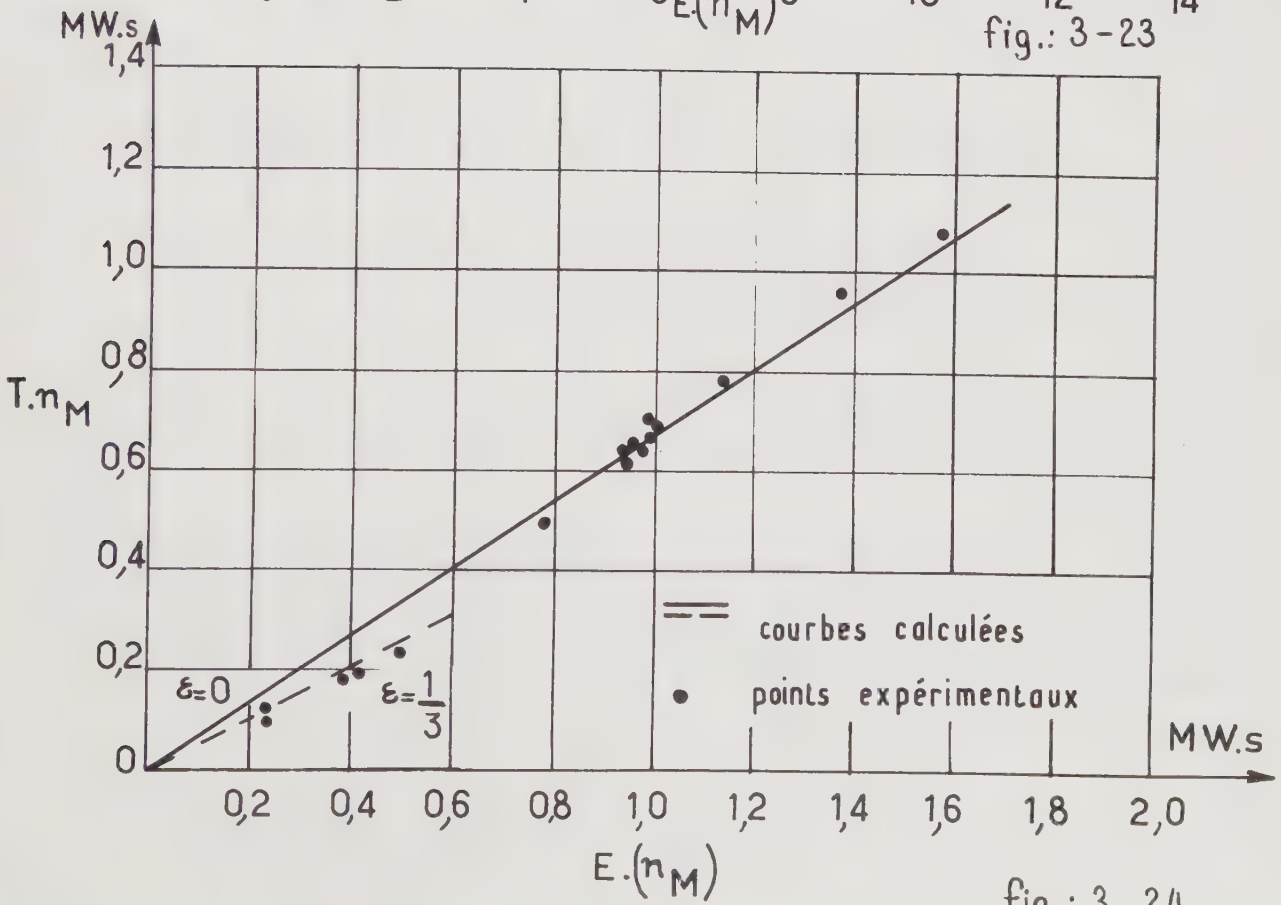


fig.: 3-24

excursions de puissance de SPERT I a donné des résultats concordants avec l'expérience surtout pour les périodes les plus courtes.

Il est possible de poursuivre le développement donné en (3-77) et poser, par exemple :

$$n = n_o \, e^{\frac{t}{T}} - n_1 \, e^{\frac{2t}{T}} + \varepsilon \frac{n_1^2}{n_o} \, e^{\frac{3t}{T}} \qquad (3\text{-}84)$$

Si ε est plus grand que 1/3, on démontre que n croît d'une façon monotone.

Pour tenir compte des phénomènes qui entraînent une diminution de puissance lors d'une excursion, il faut, comme le montre la figure 3-27, que $o \leqslant \varepsilon \leqslant 1/3$.

On remarquera alors que, pour que n puisse s'annuler, il faut que l'on ait $\varepsilon \leqslant 1/4$.

A partir de (3-84), on obtient :

$$T\, n_M = E(n_M) \cdot \frac{6\varepsilon - 1 + \sqrt{1 - 3\varepsilon}}{8\varepsilon - \frac{5}{6}(1 - \sqrt{1 - 3\varepsilon})} \qquad (3\text{-}85)$$

L'erreur faite sur le développement de n et sur les approximations $\delta k_1 \ll \delta k_o$, $n_2 \ll n_1$ devient de plus en plus importante au fur et à mesure que le transitoire de puissance devient plus lent.

On a tracé, figure 3-28, des excursions de puissance et on

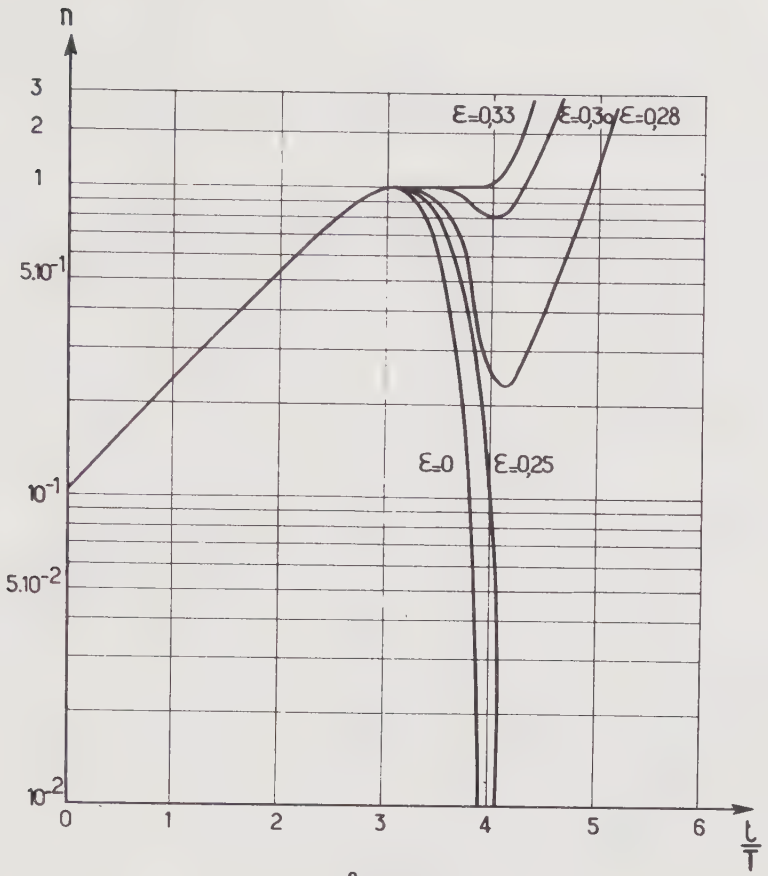


fig.: 3-27

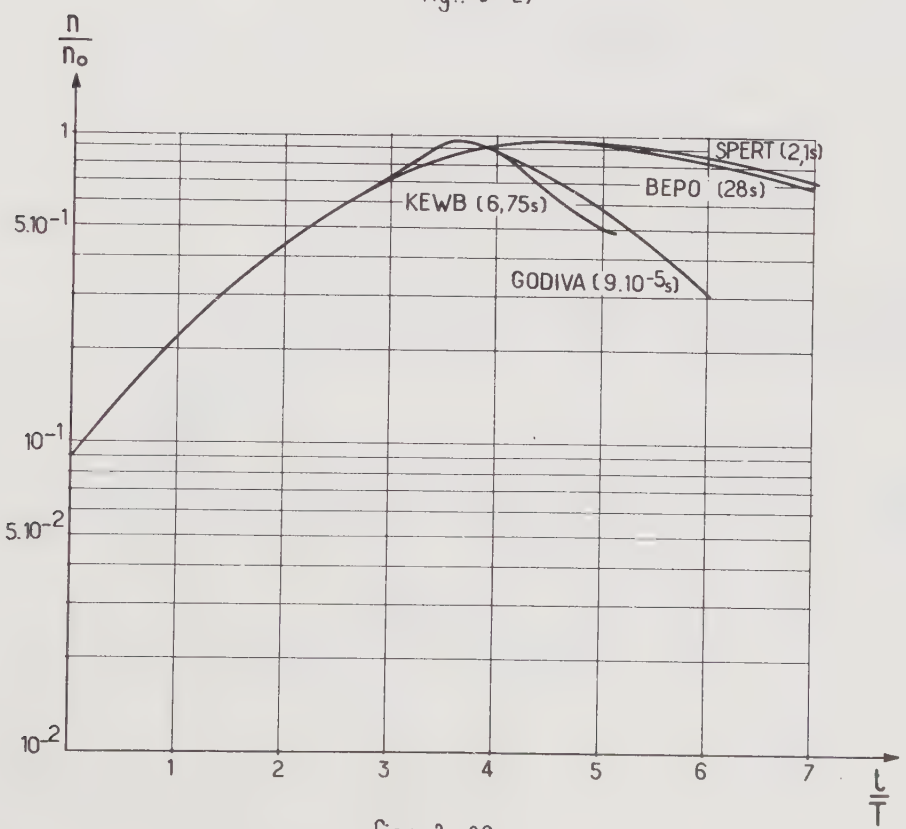


fig.: 3-28

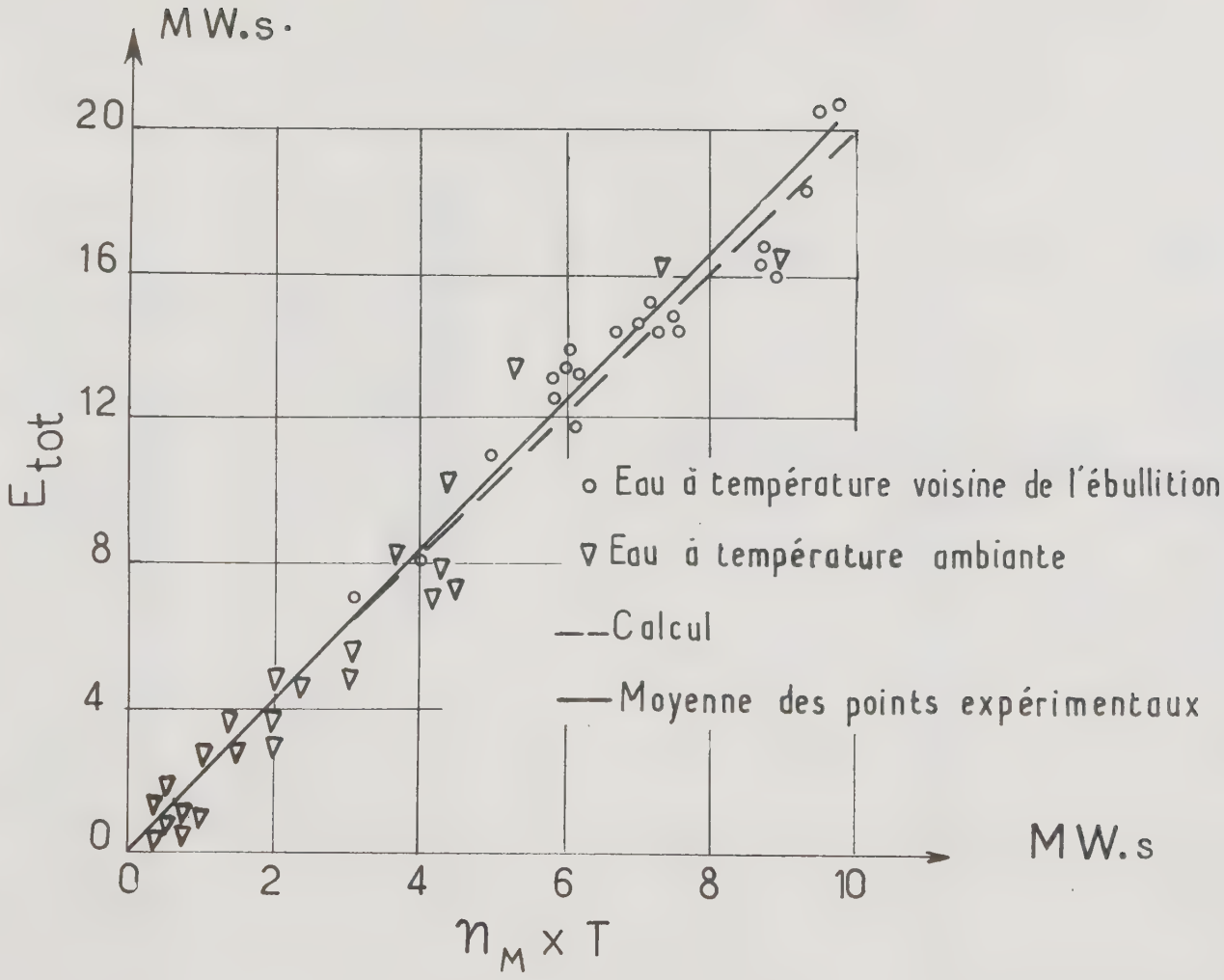

MW.s
20
16
12
8
4
0
E_{tot}
0
2
4
6
8
10
MW.s
$\eta_M \times T$
o Eau à température voisine de l'ébullition
▽ Eau à température ambiante
—— Calcul
—— Moyenne des points expérimentaux

fig 3-25

constate que ces courbes ne coïncident pas avec celles qui sont indiquées figure 3-27, tout au moins au-delà du pic de puissance.

On voit en effet, d'après les relations (3-76) et (3-77) que δk ne peut prendre la valeur δk_o et n la valeur

$$n_o \; e^{\frac{t}{T}}$$

que lorsque t tend vers $-\infty$.

Si on impose pour $t = 0$: $\delta k = \delta k_o$ et $n = n_o \, e^{\frac{t}{T}}$, on est conduit à poser :

$$\delta k = \delta k_o + \delta k_1 - \delta k_1 \, e^{\frac{t}{T}} \qquad \text{pour} \quad t > 0$$

$$\delta k = \delta k_o \qquad \text{pour } t < 0$$

$$n = n_o \, e^{\frac{t}{T}} + n_1 - n_1 \, e^{\frac{2t}{T}} \qquad \text{pour } t > 0$$

et $$n = n_o \, e^{\frac{t}{T}} \qquad \text{pour } t < 0$$

La formule (3-85) se complique, elle contient le paramètre t_M (temps correspondant au maximum de puissance) mais paraît mieux adaptée aux transitoires lents.

En partant des équations cinétiques :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{\theta} \, n + \sum_{i=1}^{i=m} \lambda_i \, C_i$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\theta} n - \lambda_i C_i$$

et de l'évolution

$$n = n_o \, e^{\frac{t}{T}} - n_1 \, e^{\frac{2t}{T}}$$

ou d'une forme plus complexe, on peut, à chaque instant, calculer la réactivité en fonction du temps, et, par différence, avoir la réactivité négative liée aux coefficients de température et aux effets de géométrie.

On a alors :

$$\delta k_o - \delta k_{(t_M)} = \frac{\theta}{T} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\beta_i \lambda_i T}{(1 + \lambda_i T)(2 + \lambda_i T)} \qquad (3\text{-}86)$$

Lorsque T tend vers zéro, $\delta k_o - \delta k_{(t_M)}$ tend vers $\frac{\theta}{T}$ et comme δk_o est assimilable à $\frac{\theta}{T} + \beta$, la réactivité compensée tend vers $\delta k_o - \beta$.

Lorsque T tend vers l'infini, $\delta k_o - \delta k_{(t_M)}$ et δk_o tendent vers

$$\frac{1}{T} \left(\theta + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\beta_i}{\lambda_i} \right)$$

On constate, sur la figure 3-29, dans le cas des réacteurs du type SPERT, que la compensation de réactivité est minima pour les périodes de l'ordre de 10^{-1} s et maxima pour les périodes de l'ordre de 10 s.

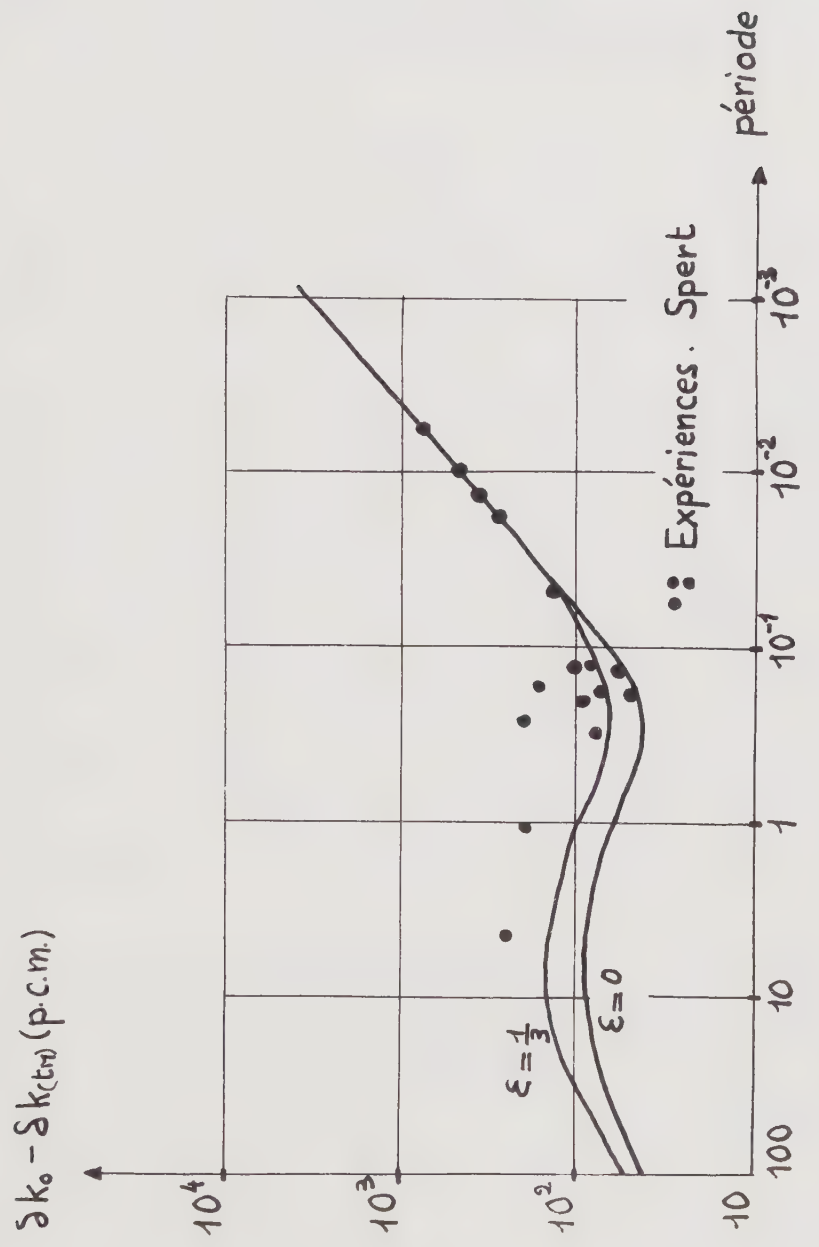

$\delta k_o - \delta k_{(t=\infty)}$ (p.c.m.)
10^4
10^3
10^2
10
100
10
1
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
période
$\varepsilon = \frac{1}{3}$
$\varepsilon = 0$
Expériences. Spert

FIG. : 3 -29

Si on tient compte, dans n, d'un terme supplémentaire en ε , on obtient :

$$\left[\delta k_o - \delta k_{(t_M)}\right]_{\varepsilon = 1/3} = \left[\delta k_o - \delta k_{(t_M)}\right]_{\varepsilon = 0} + T \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\beta_i \lambda_i T}{(1 + \lambda_i T)(2 + \lambda_i T)(3 + \lambda_i T)}$$

Le terme supplémentaire est négligeable pour les petites et les grandes valeurs de T.

Chapitre IV

INFLUENCE DE LA VITESSE DE LIBERATION DE REACTIVITE SUR LA SECURITE DE FONCTIONNEMENT DES PILES ATOMIQUES

4.1. Limite inférieure et limite supérieure de cette vitesse.

Le démarrage d'une pile demeure certainement une des opérations les plus délicates dans sa conduite.* Il est fondamental de pouvoir suivre à tout instant dans cette opération l'évolution en puissance de la pile ainsi que sa période souvent définie par $\frac{1}{T} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt}$. Il faut que cette évolution soit toujours commandée par les neutrons retardés. En effet, une pile qui diverge sur les seuls neutrons instantanés, devient vite pratiquement incontrôlable. La réactivité correspondante est celle qui correspond à la fraction β des neutrons retardés qui pour l'uranium 235 est comprise entre 660 et 750 p. c. m. Alors que pour le plutonium 239, elle est égale par exemple à 230 p. c. m.

Dans cette opération de démarrage il est d'usage de limiter la période à la divergence à plusieurs secondes. Nous avons vu précédemment les relations qui définissent la puissance neutronique et la période en fonction de la vitesse de libération de réactivité.

On peut dire que l'opération de démarrage sera d'autant plus sûre que cette vitesse de libération de réactivité est faible. On aura intérêt à ne diverger que sur une barre de contrôle dont l'efficacité est $< \beta$ lorsque cela est possible.

* Référence [14]

En général la procédure du point de vue sécurité est la suivante. On s'assure d'abord du bon fonctionnement de toutes les chaînes de mesures. Toutes les barres absorbantes doivent être en position basse. Puis on relève les barres de sécurité qui, elles, ont souvent une efficacité supérieure à β. Si l'on est certain de ne jamais diverger au cours de la montée de ces barres au cours de la vie de la pile, on pourra leur donner des vitesses de libération de réactivité assez grande, des vitesses de l'ordre de 100 p.c.m. sont courantes. Ensuite on relèvera les barres de compensation qui ont en général des vitesses de libération de réactivité beaucoup plus faible de l'ordre de quelques p.c.m./s. On peut diverger soit au cours de la montée de ces barres, soit au cours de la montée des barres de pilotage.

Le risque à envisager ici du point de vue sécurité est la panne qui entraîne une barre à vitesse continue et constante en dehors du coeur sans possibilité d'arrêt. L'incident qui est lié à cette panne sera d'autant moins grave que la vitesse de libération de réactivité est faible si la barre est très efficace, ou que l'efficacité totale de la barre est faible si la vitesse de libération de réactivité est grande.

Les verrouillages qui peuvent être liés à cette procédure seront par exemple :_Minimum de coups ou de seuil sur les chaînes de mesure avant de permettre le retrait des barres de contrôle_Impossibilité de retirer plus d'une barre à la fois_Imposer que la barre de contrôle soit retirée la dernière.

Nous allons essayer ici d'examiner l'influence de la vitesse de libération de réactivité sur le transitoire de période.

../...

4.2. Relation entre la vitesse de libération de réactivité et le transitoire de période.

Nous supposons ici que cette mesure de la période est faite à partir de la dérivée logarithmique de la puissance. Les sécurités de période qui font partie des chaînes de sécurité peuvent fonctionner pendant le transitoire lié à une variation de réactivité.

Nous allons montrer que le réglage des seuils de sécurité période est souvent incompatible avec les vitesses de libération de réactivité.* Il y a alors un compromis à faire entre la vitesse de réponse du périodemètre logarithmique et la vitesse de libération de réactivité dans la pile. Lorsque ce compromis n'est pas fait pendant la période de démarrage, les conducteurs de piles sont amenés à court-circuiter les sécurités période pendant le démarrage pour éviter les chutes de barres intempestives et ceci est un inconvénient sérieux du point de vue sûreté.

Envisageons d'abord le cas du saut de réactivité dans la théorie à un seul groupe de neutrons retardés.

Soit ρ_o la réactivité à l'instant $t = 0_-$

Δk la valeur du saut de réactivité qui se produit à l'instant $t = 0_+$

ρ la valeur de la réactivité libérée dans la pile à partir de l'instant $t = 0_+$

On a $$\rho = \Delta k + \rho_o$$

Les équations cinétiques peuvent s'écrire dans la théorie à

* Référence [41]

un seul groupe de neutrons retardés :

$$\frac{1}{n}\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - k\beta}{\theta} + \frac{\lambda c}{n} + \frac{s}{n} \qquad (4\text{-}1)$$

avec $$\lambda c = k\frac{\beta}{\theta} n - \frac{dc}{dt} \qquad (4\text{-}2)$$

Ce qui conduit à :

$$\frac{1}{n}\frac{dn}{dt} = \frac{\rho}{\theta} + \frac{s}{n} - \left(\frac{dc}{dt}\right)\frac{1}{n} \qquad (4\text{-}3)$$

Lorsque l'on part d'un état d'équilibre et qu'on effectue un saut de réactivité $\Delta k > 0$, on a toujours

$$\frac{dn}{dt} \geqslant 0 \quad \text{et} \quad \frac{dc}{dt} \geqslant 0 \quad \text{et par conséquent} \quad \frac{1}{n}\frac{dn}{dt} \geqslant 0$$

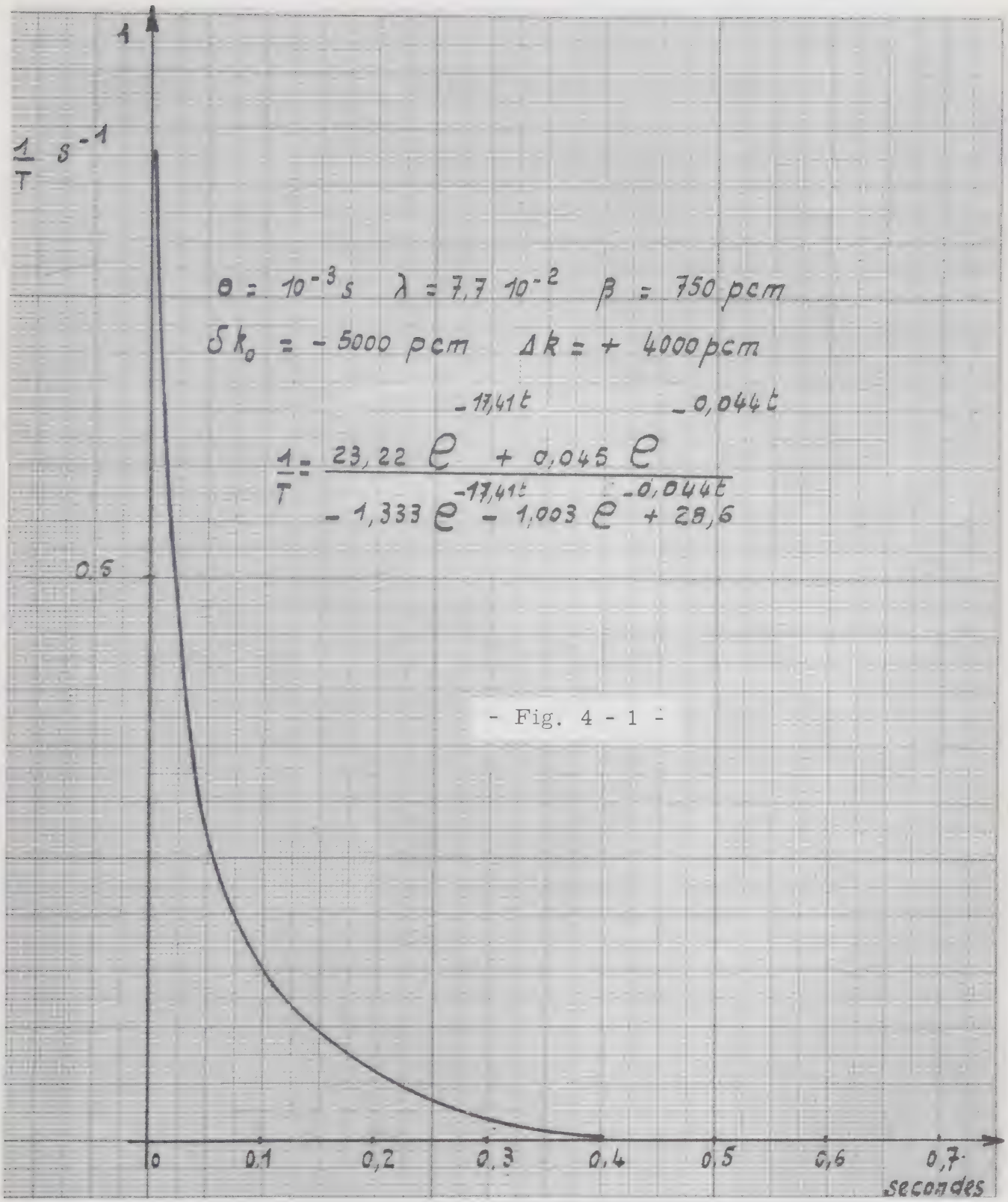
Dans le cas général ou $\frac{\rho}{\theta}$ est quelconque, $\frac{s}{n} - \left(\frac{dc}{dt}\right)\frac{1}{n}$ est toujours inférieur à $\frac{s}{n_o}$ lorsque n croît et l'on déduit que le maximum de $\frac{1}{n}\frac{dn}{dt}$ a lieu pour $t = 0$ avec $n_o = -\frac{s\theta}{\rho_o}$

Si dans (4-3) l'on fait $\frac{dc}{dt} = 0$, on trouve alors que, quel que soit ρ :

$$\left(\frac{1}{n}\frac{dn}{dt}\right)_{\text{maximum}} = \frac{\Delta k}{\theta} \qquad (4\text{-}4)$$

La période minimum se trouve à l'origine et elle est égale à $\frac{\theta}{\Delta k}$.

Sur la figure 4-1, nous avons tracé l'évolution de la période


1
1/T s⁻¹
θ = 10⁻³ s λ = 7,7 10⁻² β = 750 pcm
δk₀ = - 5000 pcm Δk = + 4000 pcm
1/T = (23,22 e^(-17,41t) + 0,045 e^(-0,044t)) / (- 1,333 e^(-17,41t) - 1,003 e^(-0,044t) + 28,6)
0,5
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
secondes

- Fig. 4 - 1 -

en fonction du temps pour une pile à eau lourde combustible uranium naturel avec :

$$\theta = 10^{-3}\ s \qquad \lambda = 7,7 \cdot 10^{-2}\ s^{-1} \qquad \beta = 750\ p.c.m.$$

$$\delta k_o = -\ 5\ 000\ p.c.m. \qquad \Delta k = +\ 4\ 000\ p.c.m.$$

L'expression de $1/T$ est indiquée sur la figure.

Sur la figure 4-2, nous avons tracé l'évolution de l'inverse de la période pour la même pile, mais avec :

$$\delta k_o = -\ 1\ 000\ p.c.m. \quad \text{et} \quad \Delta k = +\ 950\ p.c.m.$$

Sur la figure 4-3, l'évolution calculée de la période est indiquée en fonction du temps ; pour une pile à eau lourde uranium naturel $\theta = 10^{-3}$ s et pour une pile à eau légère uranium enrichi $\theta = 10^{-5}$ s. La réactivité initiale pour les deux piles est $\delta k_o = -\ 100$ p.c.m. et le saut de réactivité est $\Delta k = +\ 200$ p.c.m.

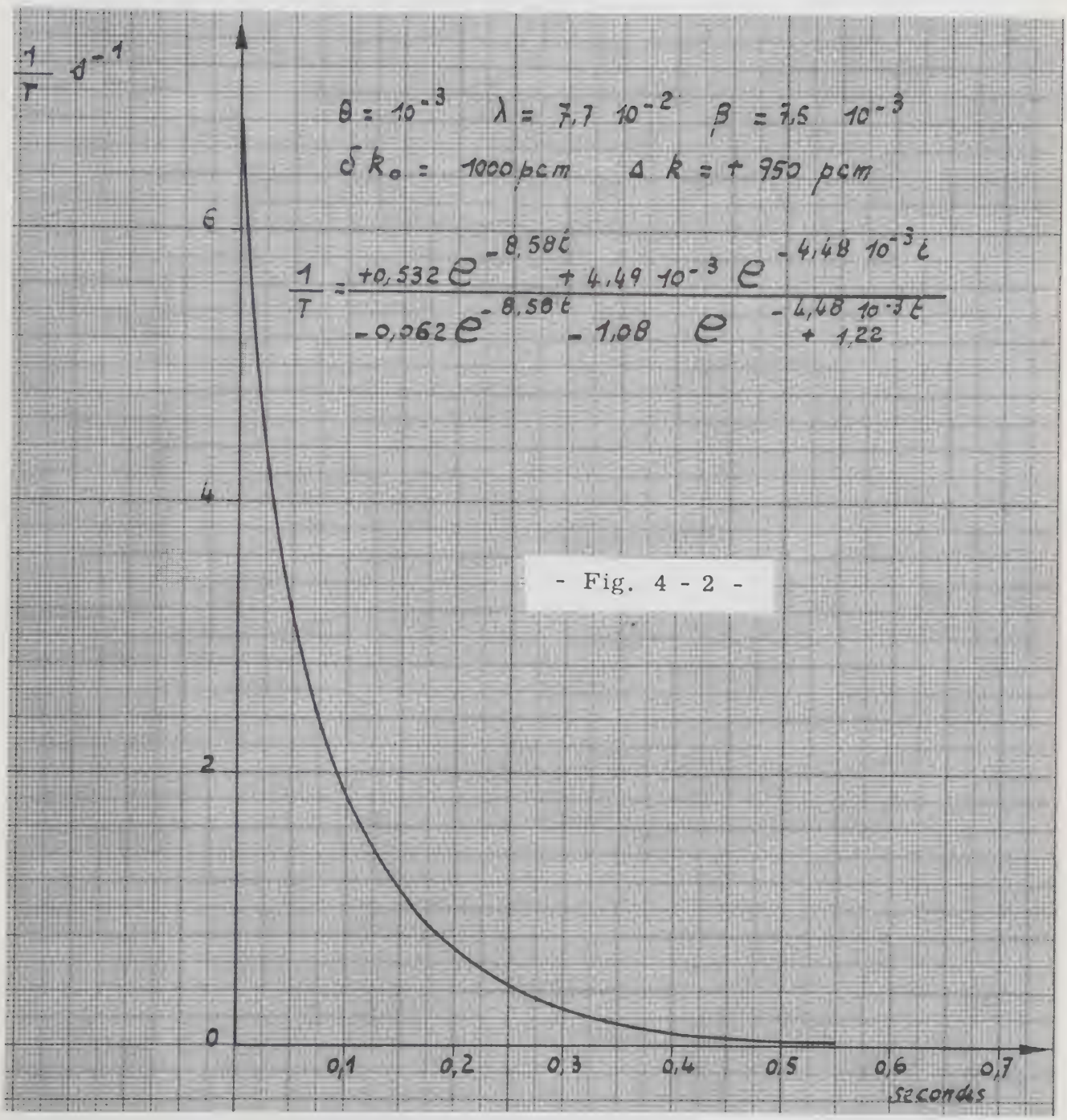
Dans le cas de variations rapides de réactivité, lorsqu'à l'instant initial la pile est critique, à l'aide de la théorie à un seul groupe de neutrons retardés, on peut calculer une formule qui donne l'évolution de la période en fonction d'une variation linéaire de réactivité.*

$$\frac{1}{T} = -\ \lambda + \frac{a + \lambda\beta}{\beta - at} \qquad (4\text{-}5)$$

Pour une pile à uranium naturel avec $\lambda = 7,7 \cdot 10^{-2}$ $\beta = 750 \cdot 10^{-5}$, en exprimant a en p.c.m., on a :

$$\frac{1}{T} = \frac{a + 57,8}{750 - at} - 7,7 \cdot 10^{-2} \qquad (4\text{-}6)$$

* Référence [42]


1/T s⁻¹
β = 10⁻³ λ = 7,7 10⁻² β = 7,5 10⁻³
δ k₀ = 1000 pcm Δ k = + 950 pcm
1/T = (+0,532 e^-8,58t + 4,49 10⁻³ e^-4,48 10⁻³ t) / (-0,062 e^-8,58t - 1,08 e^-4,48 10⁻³ t + 1,22)
6
4
2
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
seconds

- Fig. 4 - 2 -

Cette formule n'est plus valable bien entendu dès que l'on se rapproche de la criticalité en neutrons prompts.

Sur la figure 4-4, des évolutions de période ont été tracées pour des vitesses de libération de réactivité comprises entre 10 et 100 p.c.m. Dans le cas où la libération de réactivité est inférieure à β, dans la théorie à un seul groupe de neutrons retardés, la période stable atteinte après la libération de réactivité égale à at est donnée par :

$$\frac{1}{T\,s} = \frac{\lambda\ \delta k}{\beta - \delta k} = \frac{\lambda\ at}{\beta - at}$$

Pour une pile à uranium, si l'on exprime a en p.c.m., on a :

$$\frac{1}{T\,s} = \frac{7,7\ .\ 10^{-2}\ at}{750 - at} \qquad (4\text{-}7)$$

Le rapport période stable, période transitoire peut s'exprimer par la relation :

$$\frac{T\ (\text{période stable})}{T\ (\text{période transitoire})} = \frac{1 + 7,7\ .\ 10^{-2}\ t}{7,7\ .\ 10^{-2}\ t} \qquad (4\text{-}8)$$

Sur la figure 4-5, la fonction définie par la formule (4-8) est tracée ; en abscisse est portée la vitesse de libération de réactivité. La courbe en trait mixte définit le temps au-delà duquel la formule (4-8) n'est plus valable.

On constate que le rapport $\frac{\text{Période stable}}{\text{Période transitoire}}$ est indépen-

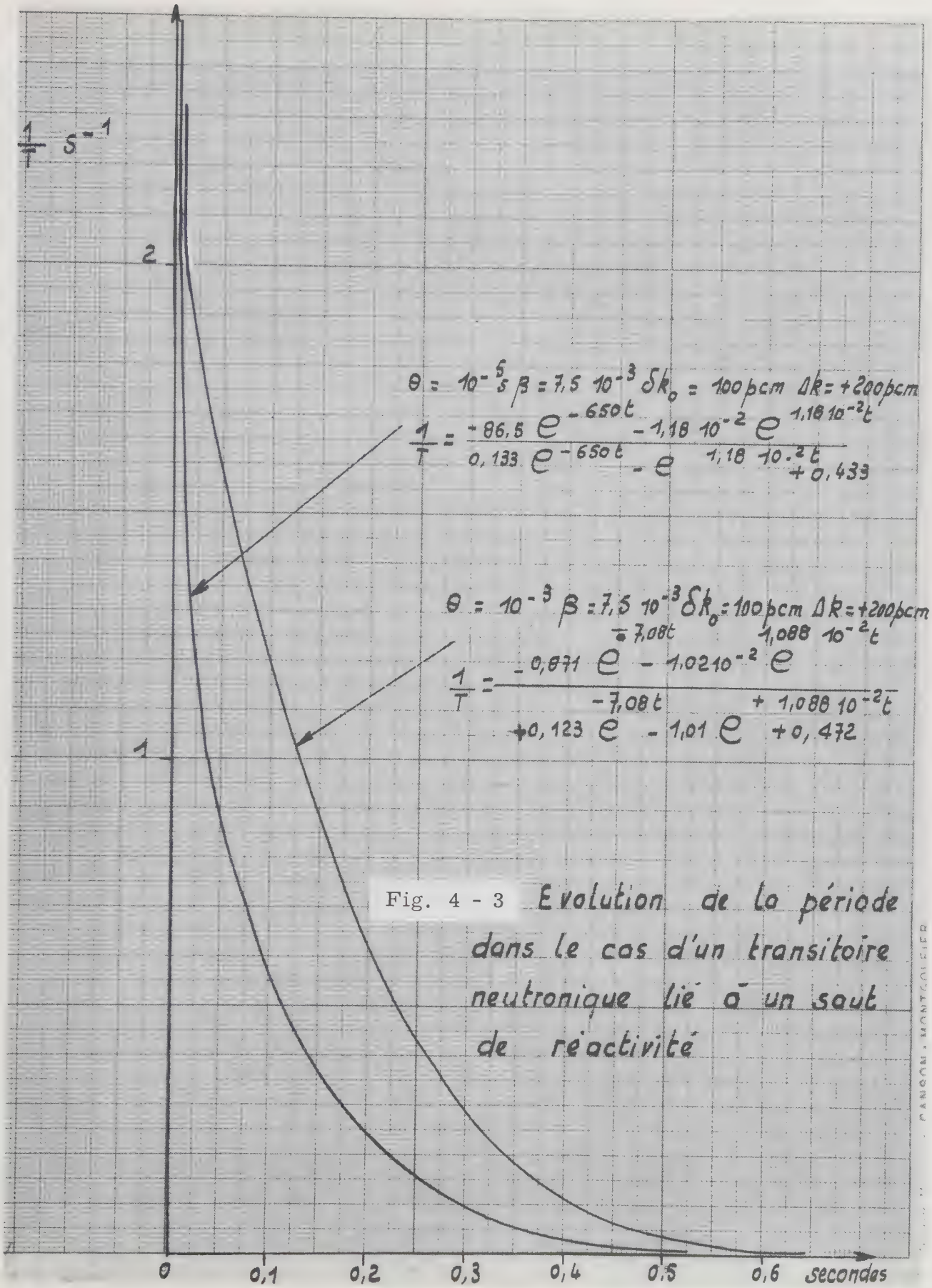
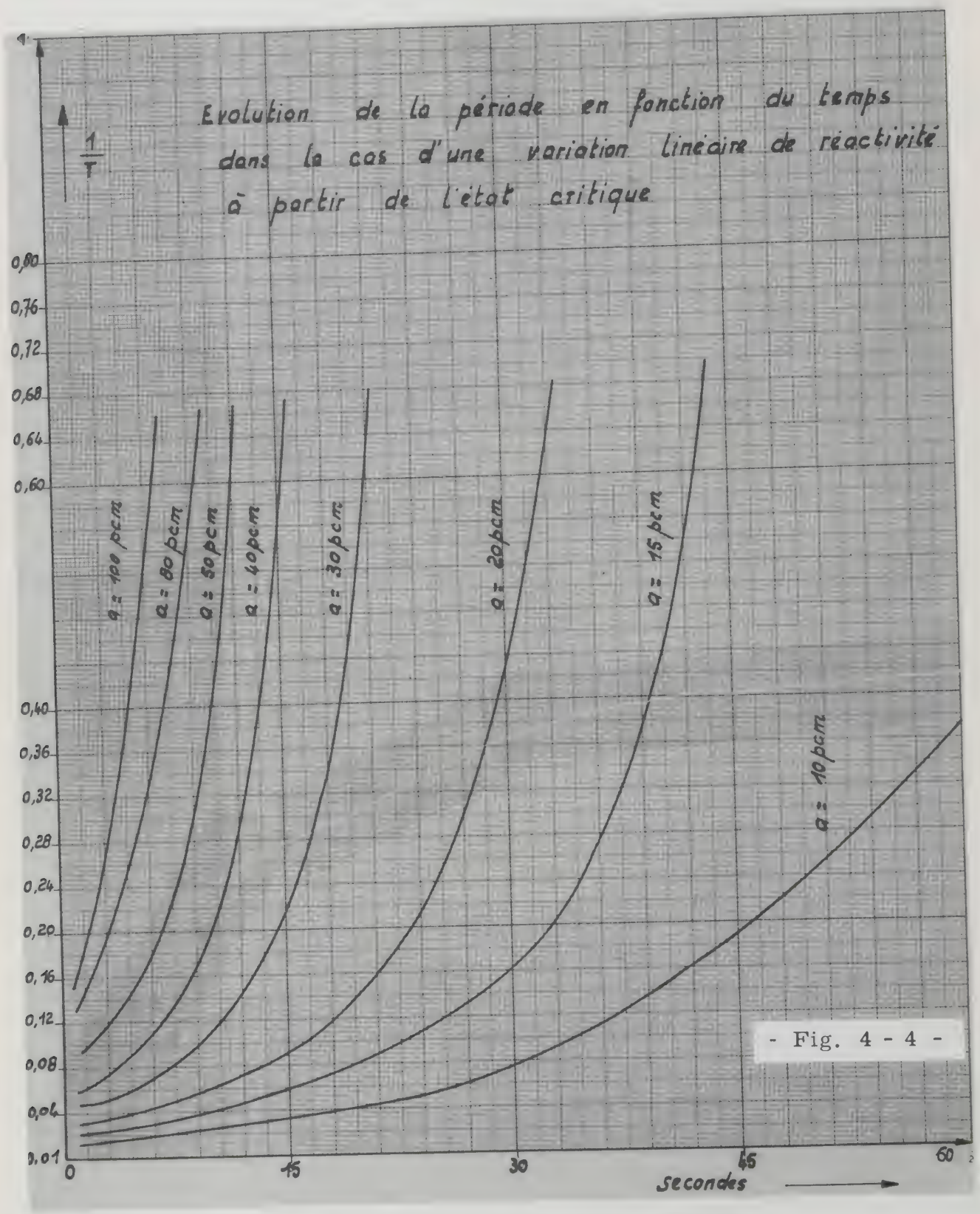
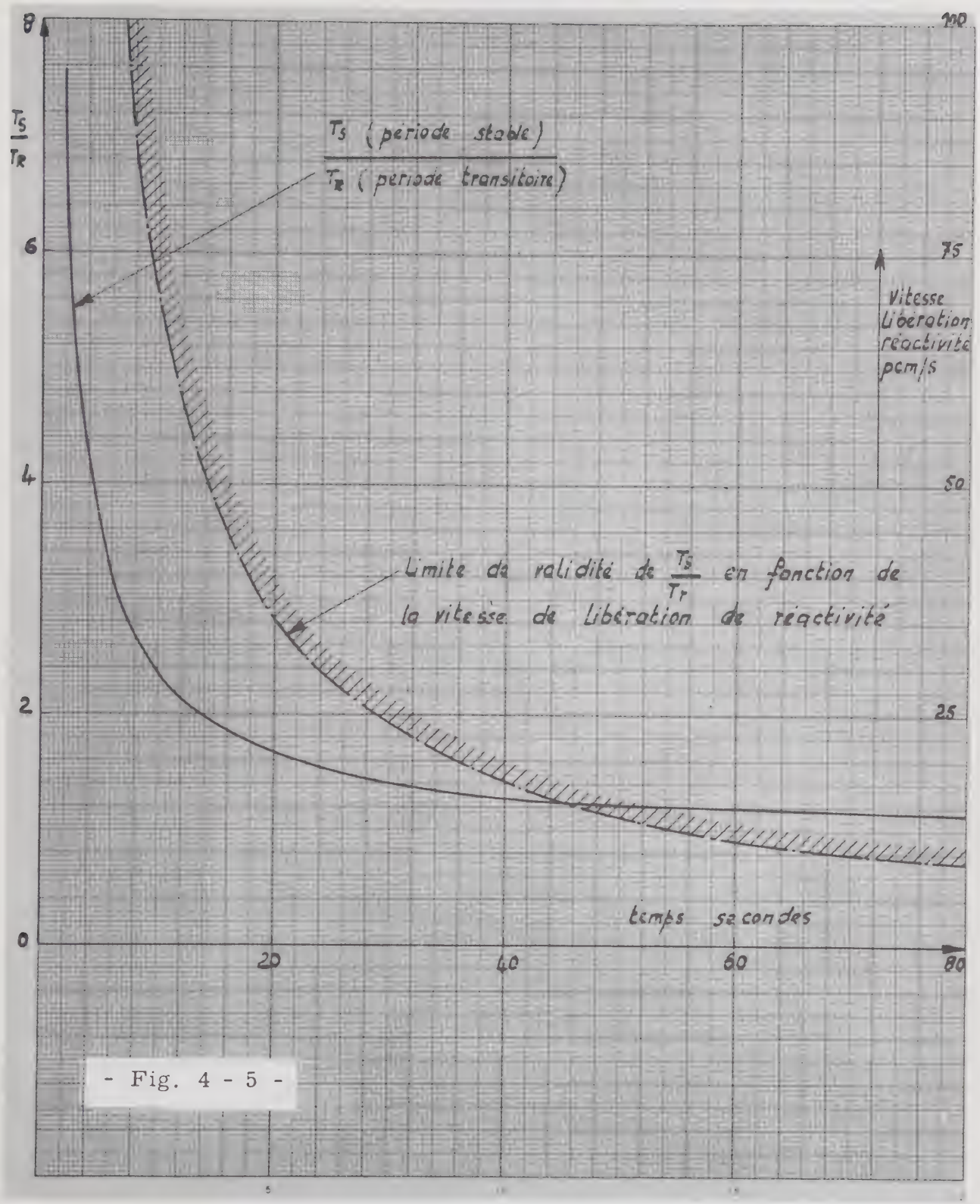


Fig. 4 - 3 Evolution de la période dans le cas d'un transitoire neutronique lié à un saut de réactivité


Evolution de la période en fonction du temps
dans le cas d'une variation linéaire de réactivité
à partir de l'état critique
1/T
0,80
0,76
0,72
0,68
0,64
0,60
0,40
0,36
0,32
0,28
0,24
0,20
0,16
0,12
0,08
0,04
0,01
0
15
30
45
60
Secondes
a = 100 pcm
a = 80 pcm
a = 50 pcm
a = 40 pcm
a = 30 pcm
a = 20 pcm
a = 15 pcm
a = 10 pcm

- Fig. 4 - 4 -


8
6
4
2
0
Ts/Tr
Ts (période stable)
Tr (période transitoire)
100
75
50
25
Vitesse Libération réactivité pcm/s
Limite de validité de Ts/Tr en fonction de la vitesse de libération de réactivité
temps secondes
20
40
60
80

- Fig. 4 - 5 -

dant de la vitesse de libération de réactivité et ce résultat surprenant ne se confirme pas dans la théorie à 6 groupes de neutrons retardés ; il est dû aux approximations faites.

Par contre l'augmentation du rapport $\frac{\text{Période stable}}{\text{Période transitoire}}$ en fonction inverse de la libération totale de réactivité se confirme lorsqu'on applique la théorie à 6 groupes de neutrons retardés et qu'on utilise une machine analogique pour calculer l'évolution de période dans le cas d'une libération linéaire de réactivité aussi bien à partir de l'état critique, qu'à partir de l'état sous-critique.

Nous avons essayé d'analyser les résultats obtenus sur calculatrice analogique pour des piles à eau légère, combustible uranium enrichi du type pile piscine.

Les figures 4-6, 4-7, 4-8, représentent les variations de la période transitoire maximum en fonction du taux de libération de réactivité pour différentes conditions initiales et pour des temps de vie moyen des neutrons dans la pile : 10^{-3} s - 10^{-4} s et 10^{-5} s.

On constate que la période transitoire est d'autant plus faible que la vitesse de libération de réactivité est grande. Les courbes montrent bien, d'autre part, que le rapport $\frac{\text{Période stable}}{\text{Période transitoire}}$ varie en fonction inverse de la libération totale de réactivité.

Par contre, la variation de la période transitoire minimum en fonction du temps de vie des neutrons dans la pile est assez peu marquée comme le montrent les courbes de la figure 4-9.

D'après ces renseignements, on peut affirmer que dans tous

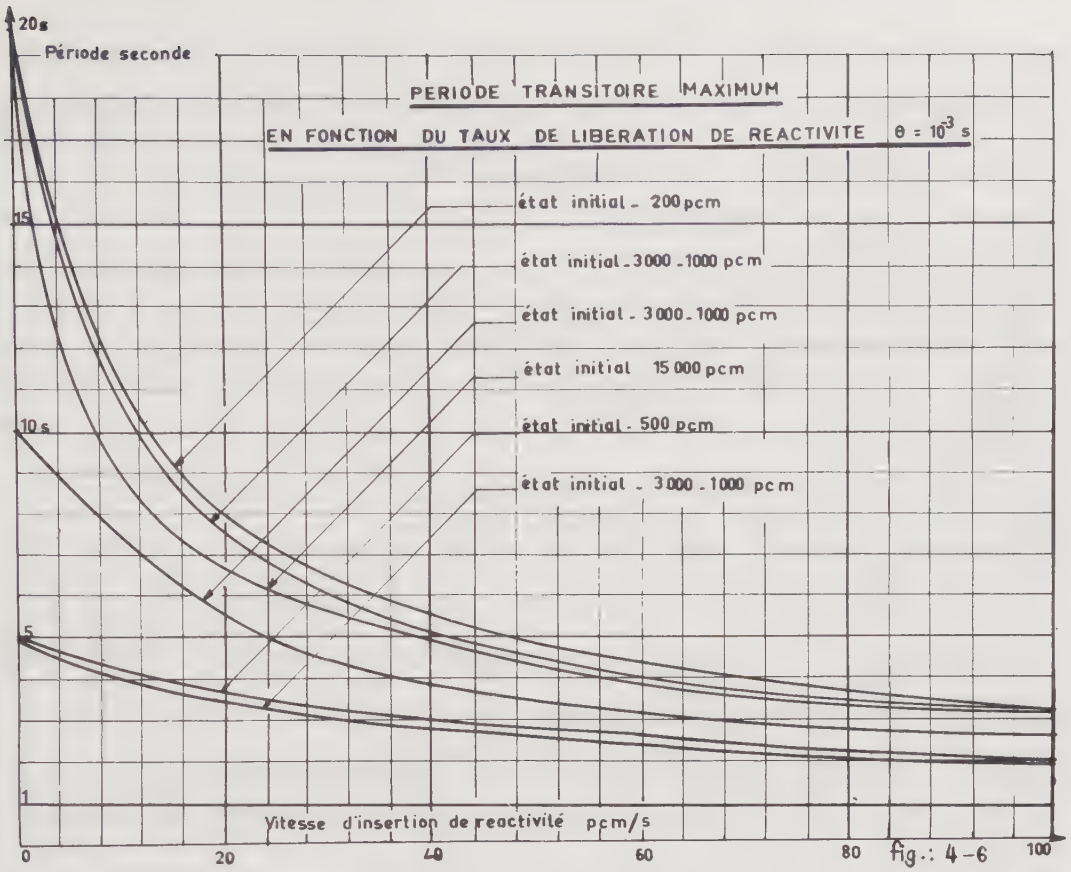

20s
Période seconde
PERIODE TRANSITOIRE MAXIMUM
EN FONCTION DU TAUX DE LIBERATION DE REACTIVITE θ = 10⁻³ s
état initial - 200 pcm
état initial - 3000 - 1000 pcm
état initial - 3000 - 1000 pcm
état initial 15 000 pcm
état initial - 500 pcm
état initial - 3000 - 1000 pcm
15
10 s
5
1
Vitesse d'insertion de réactivité pcm/s
0
20
40
60
80
100

Fig.: 4-6

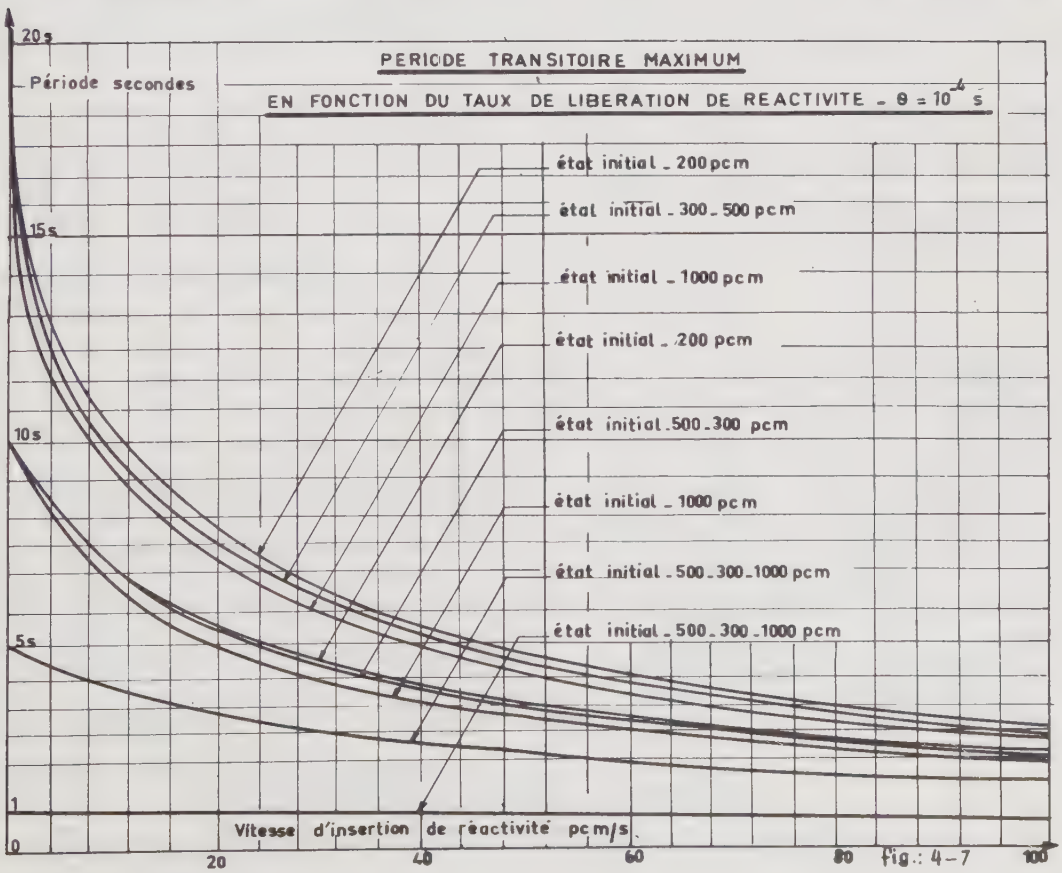

20 s
Période secondes
PERIODE TRANSITOIRE MAXIMUM
EN FONCTION DU TAUX DE LIBERATION DE REACTIVITE - θ = 10⁻⁴ s
état initial - 200 pcm
état initial - 300 - 500 pcm
état initial - 1000 pcm
état initial - 200 pcm
état initial - 500 - 300 pcm
état initial - 1000 pcm
état initial - 500 - 300 - 1000 pcm
état initial - 500 - 300 - 1000 pcm
15 s
10 s
5 s
1
Vitesse d'insertion de réactivité pcm/s
0
20
40
60
80
100

Fig.: 4-7

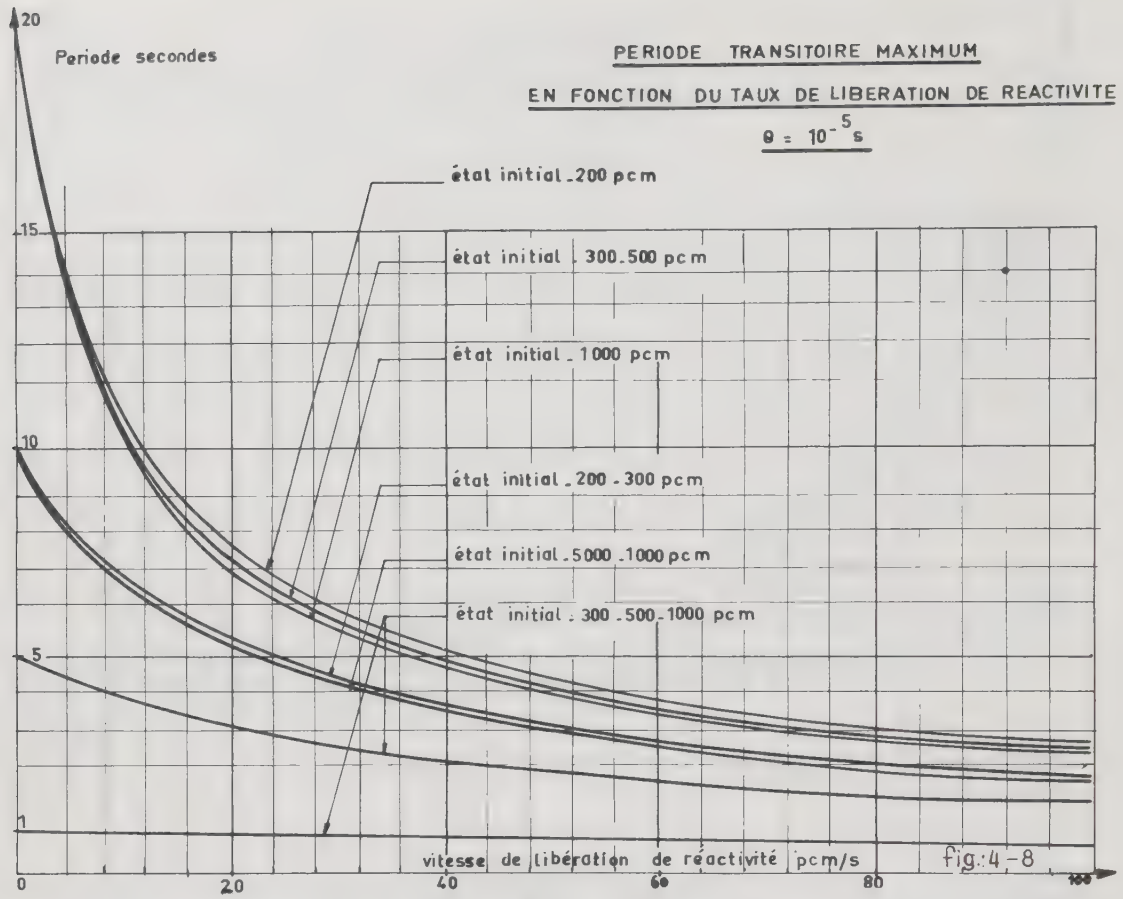
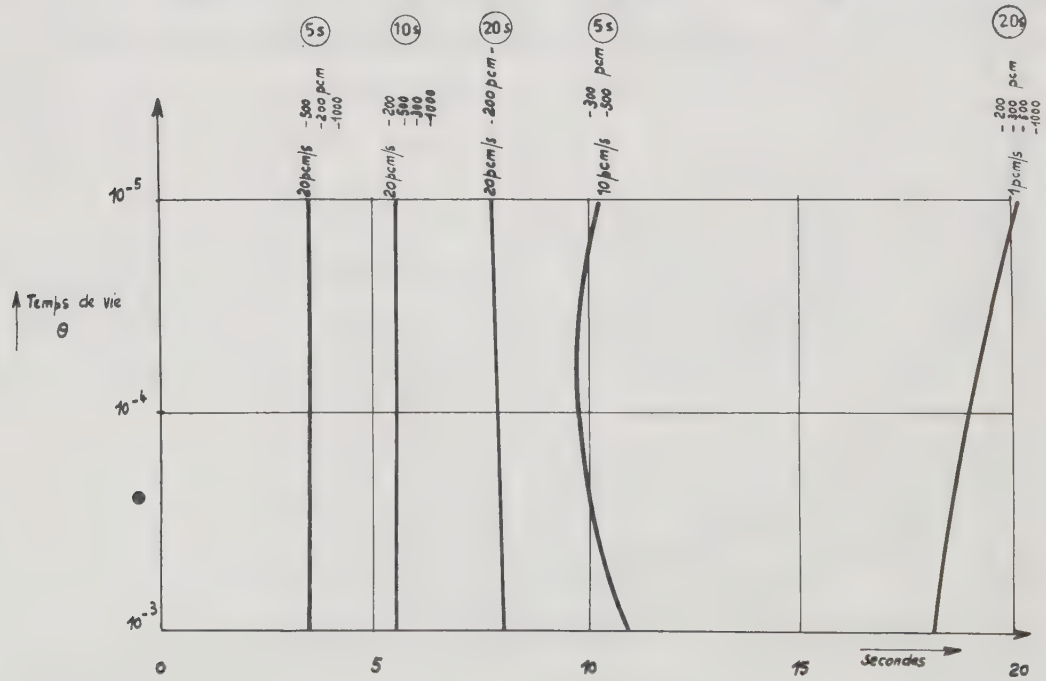


fig.: 4-8



VARIATION DE LA PERIODE TRANSITOIRE MAXIMUM

EN FONCTION DU TEMPS DE VIE DES NEUTRONS DANS LA PILE

fig.: 4-9

les cas la période transitoire n'est pas gênante lorsque les évolutions de réactivité sont lentes. Au-delà de l'état critique, pour que la période transitoire ne perturbe pas le fonctionnement de la sécurité période, on peut imposer une vitesse de libération de réactivité relativement faible de l'ordre de 10 à 30 p.c.m./s avec un seuil de sécurité de période fixé entre 1 à 5 secondes, à condition que la vitesse de réponse de l'électronique soit grande.

Dans le domaine sous-critique, les évolutions de réactivité sont en générale assez rapides, c'est le cas par exemple des barres de sécurité qui libèrent souvent 100 p.c.m./s. Si l'on dispose d'une électronique rapide, le transitoire de période, qui le plus souvent est inférieur à 1 seconde, fera fonctionner intempestivement la sécurité période alors qu'aucun danger ne menace la sécurité de fonctionnement de la pile. Ces chutes de barres intempestives ne peuvent être supprimées que si l'on court-circuite alors la sécurité période.

Pour les piles de puissance, on peut envisager d'imposer pour le démarrage sous-critique des vitesses de barres relativement faibles à condition, bien entendu, que ces vitesses soient compatibles avec le programme de fonctionnement de la pile.

Par contre, pour les expériences critiques à l'état sous-critique, on ne peut envisager d'imposer des vitesses de libération de réactivité faibles. Ceci entraînerait par ailleurs des puissances de divergence trop grandes qui gêneraient beaucoup les expérimentateurs. La sécurité rapide période doit alors être court-circuitée* sur les premières décades de puissance. Ceci ne peut être admis du point de vue sûreté que si l'on dispose par ailleurs de plusieurs dispositifs de sécurité rapides sur la mesure de puissance.

* ou affectée d'une constante de temps importante

Dans tous les cas la sécurité période rapide semble incompatible avec le transitoire de puissance neutronique lié à des variations rapides de réactivité. La solution la plus satisfaisante serait d'avoir une sécurité sur la réactivité même. Mais ceci entraîne la nécessité de disposer d'un réactimètre pouvant fonctionner sur un grand nombre de décades.

Pour les piles à haut flux l'évolution de l'empoisonnement Xénon, après arrêt a aussi une influence importante sur la vitesse de libération de réactivité après arrêt.

4.3. Vitesse de libération de réactivité et vitesse d'empoisonnement Xénon.

On sait, en effet, que dans les piles à haut flux, après arrêt brutal de fonctionnement, lié par exemple à une chute des barres de sécurité, l'empoisonnement xénon croît pour atteindre un maximum au bout de quelques heures. Il est souvent difficile de disposer d'un excès de réactivité permettant de redémarrer la pile à n'importe quel moment après l'arrêt brusque. D'ailleurs même s'il était possible de disposer de cet excès de réactivité, on peut dire qu'il est défavorable pour la sûreté de fonctionnement et que d'autre part il est très coûteux.

Aussi le but qu'on se propose ici est d'étudier l'évolution de l'empoisonnement de xénon, dans différents cas de démarrage de la pile, pour un fonctionnement à puissance nominale, et de voir alors les vitesses qu'il est possible d'attribuer aux barres de contrôle pour pouvoir

démarrer la pile sans disposer dans le coeur d'un excès de réactivité trop important.*

On suppose ici dans le coeur pile, une répartition uniforme de flux neutronique et de la concentration xénon. Dans cette hypothèse on sait que les évolutions de concentration xénon et iode 135 se calculent à l'aide des équations :

$$\frac{dX}{dt} = \lambda_i I + \gamma_x \sum_f \Phi - \sigma_2 X \Phi - \lambda_x X \qquad (4\text{-}9)$$

$$\frac{dI}{dt} = - \lambda_i I + \gamma_i \sum_f \Phi \qquad (4\text{-}10)$$

Dans lesquelles :

X = concentration du xénon 135
I = concentration de l'iode 135
Φ = flux de neutrons thermiques
λ_i = constante radioactive de l'iode 135
λ_x = constante radioactive du xénon 135 .
γ_i = rendement de fission pour le télurium et l'iode 135
γ_x = rendement de fission pour le xénon 135
σ_2 = section efficace microscopique de capture des neutrons par le xénon
$\sum_f$ = section efficace microscopique de fission du combustible.

Nous adopterons pour valeurs des différentes constantes celles données à la Conférence Internationale de Genève, 1958, avec :

$\lambda_i = 2,89 \cdot 10^{-5}\ s^{-1}$ $\qquad$ $\lambda_x = 2,09 \cdot 10^{-5}\ s^{-1}$

* Références [43] et [44]

$\gamma_i = 6,1 \cdot 10^{-2}$ $\gamma_x = 3 \cdot 10^{-3}$ $\sigma_2 = 2,7 \cdot 10^{-18}\ cm^2$

Il est intéressant de diviser les deux équations précédentes par $\sum_f$ et de faire apparaître les variables dites réduites :

$$x = \frac{X}{\sum_f} \qquad i = \frac{I}{\sum_f}$$

On obtient alors les équations :

$$\frac{dx}{dt} = \lambda_i i + \gamma_x \Phi - \sigma_2 x \Phi - \lambda_x x \qquad (4\text{-}11)$$

$$\frac{di}{dt} = - \lambda_i i + \gamma_i \Phi \qquad (4\text{-}12)$$

On définit souvent la réactivité liée à la concentration xénon dans le coeur pile par le rapport :

$$\rho_x = \frac{\text{nombre de neutrons thermiques absorbés par le xénon}}{\text{nombre de neutrons thermiques absorbés dans l'uranium}}$$

ce qui entraîne :

$$\rho_x = \frac{X \sigma_2}{\sum_u} \quad \text{ou} \quad \rho_x = x \sigma_2 \frac{\sum_f}{\sum_u}$$

x étant une variable universelle pour toutes les piles à uranium

et $\frac{\sum_f}{\sum_a}$ étant une caractéristique bien définie pour une pile dans un état donné.

Par exemple pour EL 3 on a approximativement :

$$\frac{\sum_f}{\sum_a} = 0,53$$

Alors que pour les piles du type PEGASE ou SILOE on trouve dans les avant-projets :

$$\frac{\sum_f}{\sum_a} = 0,605$$

a) Cas de l'évolution de l'empoisonnement xénon pendant le démarrage après arrêt prolongé.

On suppose ici que le démarrage ou la montée en puissance se fait dans un temps inférieur à celui lié à λ_i^{-1} et λ_x^{-1}. On suppose de plus qu'à l'instant t = 0 où le flux a une valeur Φ_1 qui correspond à celle de la puissance nominale de fonctionnement $x \simeq 0$ et $i \simeq 0$. L'intégration des équations (4-11) et (4-12) conduit alors à l'expression :

$$x = \frac{(\gamma_i + \gamma_x)\,\Phi_1}{\lambda_x + \sigma_2\,\Phi_1}\left\{1 - e^{-(\lambda_x + \sigma_2 \Phi)\,t}\right\} - \frac{\gamma_i\,\Phi_1}{\lambda_x - \lambda_i + \sigma_2\,\Phi_1}\left\{e^{-\lambda_i t} - e^{-(\lambda_x + \sigma_2 \Phi)t}\right\} \quad (4\text{-}13)$$

Sur la figure 4-10, on a porté les évolutions de x en fonction du temps pour des valeurs de Φ_1 comprises entre 10^{13} n cm^{-2} s^{-1} et 10^{15} n cm^{-2} s^{-1}. On constate que la valeur d'équilibre est atteinte d'autant plus vite que le flux est élevé. Cette valeur est d'ailleurs atteinte en moyenne au bout de 30 heures de marche à flux constant.

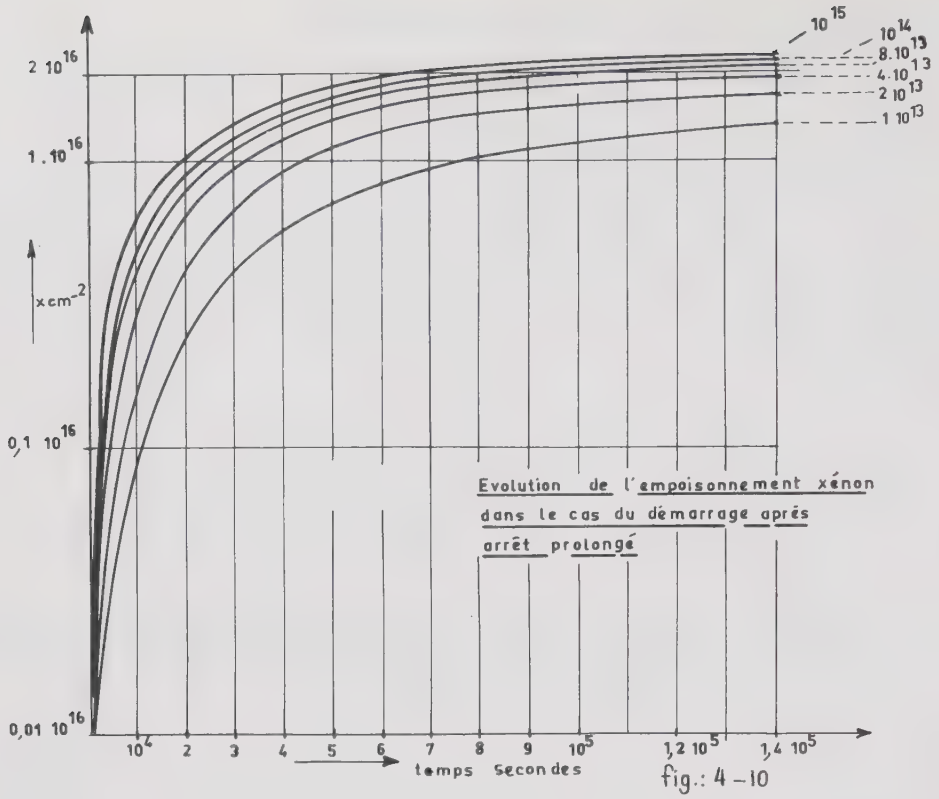


fig.: 4 –10

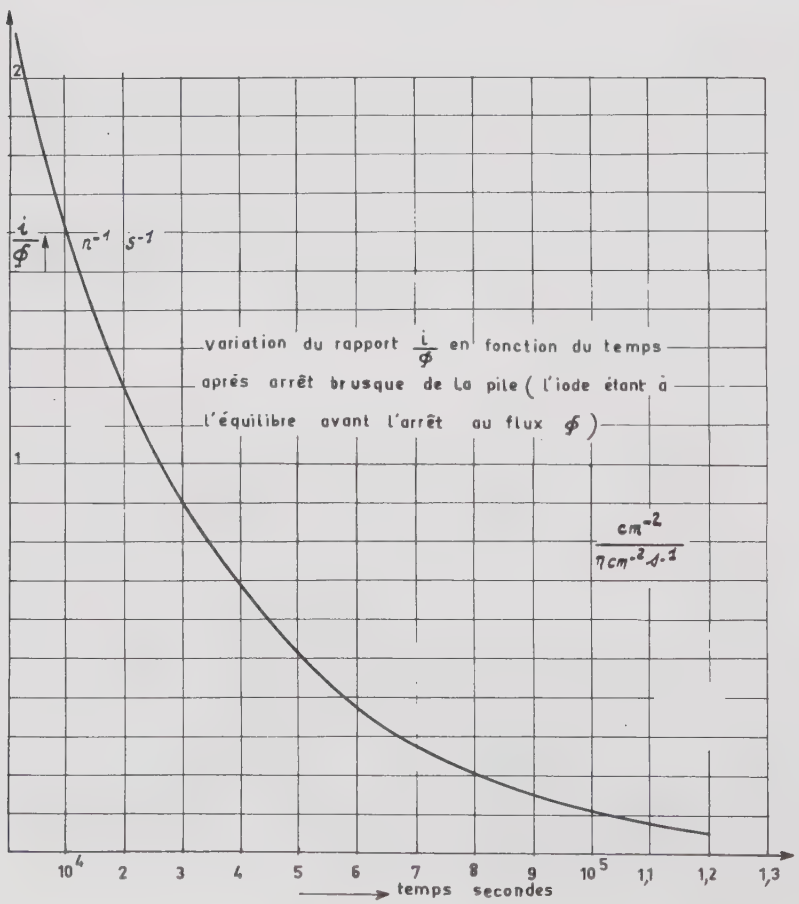


fig.: 4 –11

Un des cas les plus intéressants est le suivant:

b) Evolution des concentrations xénon et iode après arrêt brusque.

On suppose qu'après un fonctionnement prolongé à flux constant, les concentrations d'équilibre d'iode et du xénon aient été atteintes,* c'est-à-dire :

$$x_E = \frac{\gamma_i + \gamma_x}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi_E} \Phi_E \qquad i_E = \frac{\gamma_i \Phi_E}{\lambda_i} \tag{4-14}$$

L'intégration des équations générales (4-11) et (4-12) en supposant qu'au temps t = 0 où $x = x_E$, $i = i_E$ le flux passe brusquement de la valeur Φ_E à 0, donne pour x et i :

$$x = \Phi_E \left\{ \frac{\gamma_i + \gamma_x}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi_E} e^{-\lambda_x t} + \frac{\gamma_i}{\lambda_x - \lambda_i} e^{-\lambda_i t} \right\} - \frac{\gamma_i \Phi_E}{\lambda_x - \lambda_i} e^{-\lambda_x t} \tag{4-15}$$

$$\frac{i}{\Phi} = \frac{\gamma_i}{\lambda_i} e^{-\lambda_i t} \tag{4-16}$$

L'égalité (4-16) montre qu'on peut avoir l'expression de l'évolution de i en fonction du temps par une courbe générale indépendante de Φ. Cette courbe calculée est dessinée sur la figure 4-11 ou $\frac{i}{\Phi}$ est exprimé en neutrons s^{-1}.

* Référence [45]

Sur la figure 4-12, les évolutions des concentrations xénon après arrêt brusque ont été portées pour des valeurs de flux comprises entre 10^{13} et 10^{15} n cm^{-2} s^{-1}. Le maximum de l'empoisonnement xénon peut s'obtenir à partir de l'expression (4-15). La dérivation de (4-15) donne en effet pour valeur du temps où se produit ce maximum d'empoisonnement xénon :

$$t_M = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_x} \; L_e \left(- \frac{h \lambda_i}{g \lambda_x} \right) \qquad (4\text{-}17)$$

avec pour valeurs respectives α et β

$$g = \frac{\gamma_i + \gamma_x}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi} - \frac{\gamma_i}{\lambda_x - \lambda_i} \quad \text{et} \quad h = \frac{\gamma_i}{\lambda_x - \lambda_i} \qquad (4\text{-}18)$$

En portant cette valeur de t_M dans l'expression (4-15), on a les valeurs de x maximum. Ces valeurs calculées pour différentes valeurs de Φ sont indiquées sur la figure 4-13.

L'expression (4-17) montre que t_M croît avec le flux mais qu'il a une valeur asymptote pour Φ très grand, égale à :

$$\frac{1}{\lambda_i - \lambda_x} \; L_e \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_x} \right) \quad \text{soit sensiblement } 4,04 \; . \; 10^4 \text{ s}$$

Les valeurs de t_M en fonction du flux sont portées sur la figure 4-14. Il est intéressant de connaître le temps qui s'écoule entre l'instant où se produit l'arrêt brusque et le moment où l'empoisonnement xénon est égal à sa valeur initiale d'équilibre.

Ce temps est déterminé par l'égalité :

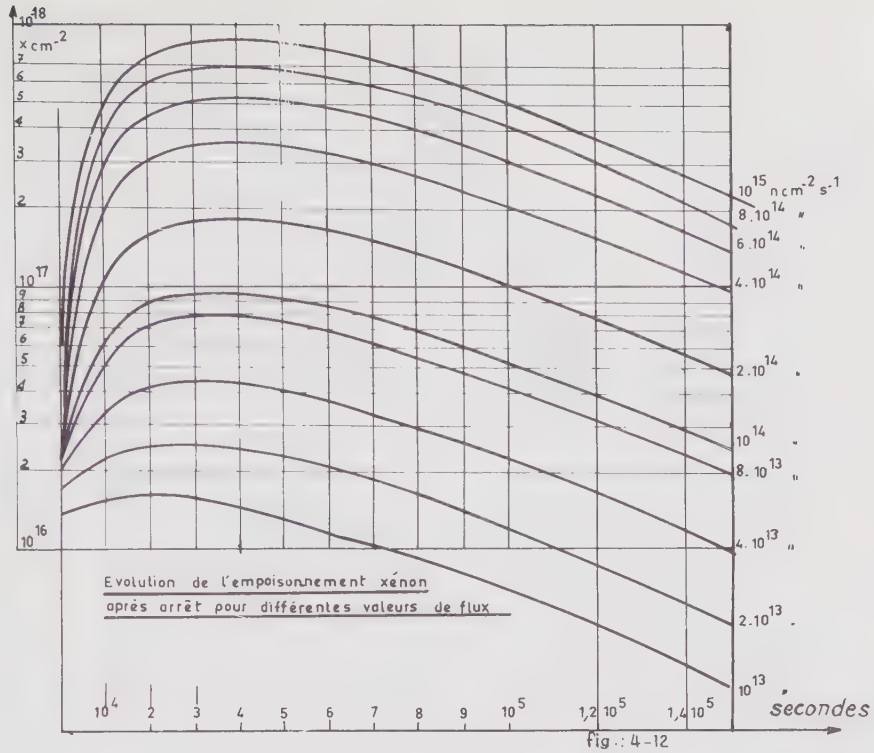


fig.: 4-12

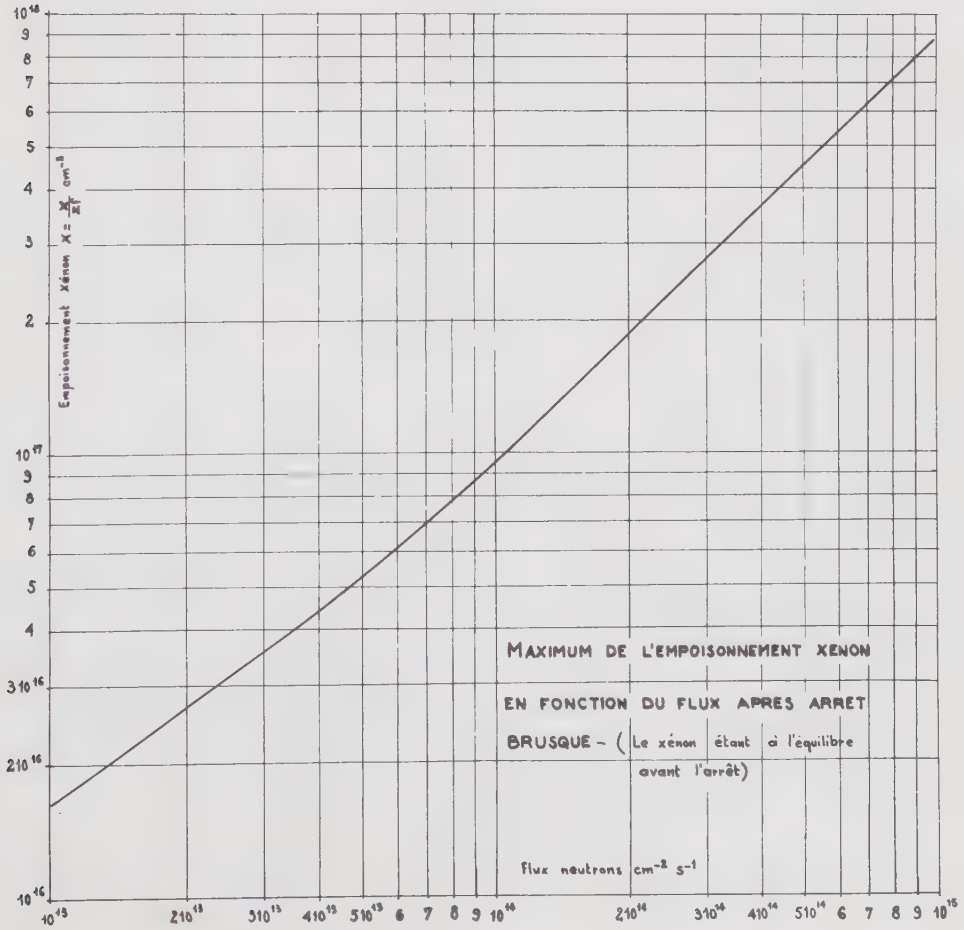


fig.: 4-13

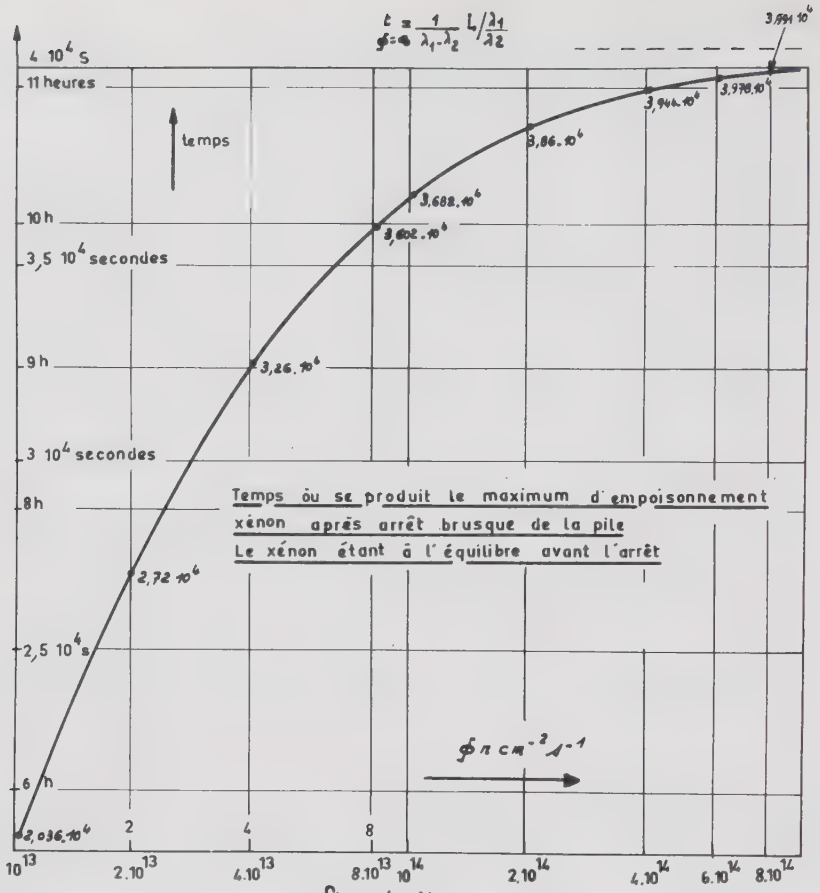


fig.: 4-14

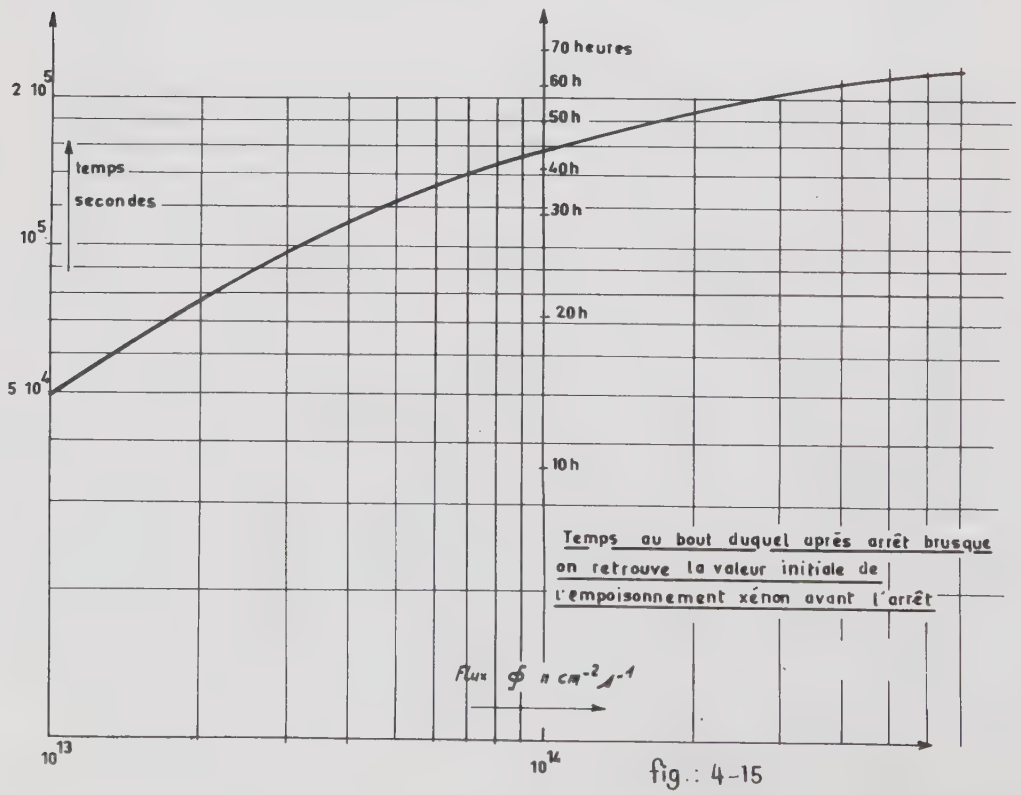


fig.: 4-15

$$\left\{ \frac{\gamma_i + \gamma_x}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi} - \frac{\gamma_i}{\lambda_i - \lambda_x} \right\} e^{-\lambda_x t} + \frac{\gamma_i}{\lambda_x - \lambda_i} e^{-\lambda_i t}$$

$$= \frac{\gamma_i + \gamma_x}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi} \qquad (4\text{-}19)$$

qui peut encore se mettre sous la forme simplifiée :

$$\frac{e^{-\lambda_i t} - e^{-\lambda_x t}}{1 - e^{-\lambda_x t}} = \frac{\gamma_i + \gamma_x}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi} \cdot \frac{\lambda_x - \lambda_i}{\gamma_i} \qquad (4\text{-}20)$$

t a été calculé à partir de cette égalité pour différentes valeurs de Φ, les résultats sont indiqués sur la figure 4-15. On constate que pour des flux de l'ordre de quelques 10^{14} n cm^{-2} s^{-1}, ce temps peut- être de l'ordre de 60 heures.

Le temps où se produit la valeur maximum de la variation d'empoisonnement xénon à la suite d'un arrêt brusque, s'obtient à partir de la dérivée seconde de l'égalité (4-15)

On obtient :

$$t'_M = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_x} L_e \left(- \frac{h}{g} \frac{\lambda_i}{\lambda_x} \right) + \frac{1}{\lambda_i - \lambda_x} L_e \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_x} \right) \qquad (4\text{-}21)$$

On constate que $t'_M = t_M + \frac{1}{\lambda_i - \lambda_x} L_e \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_x} \right)$

Les valeurs de t'_M calculées en fonction du flux Φ avant arrêt brusque, sont indiquées sur la figure 4-16.

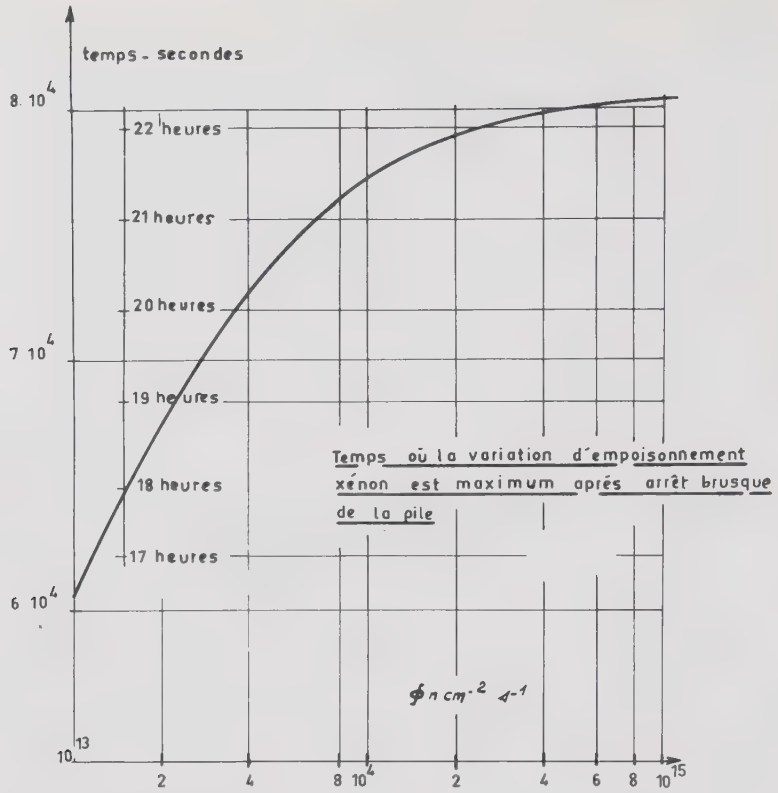


fig.: 4-16

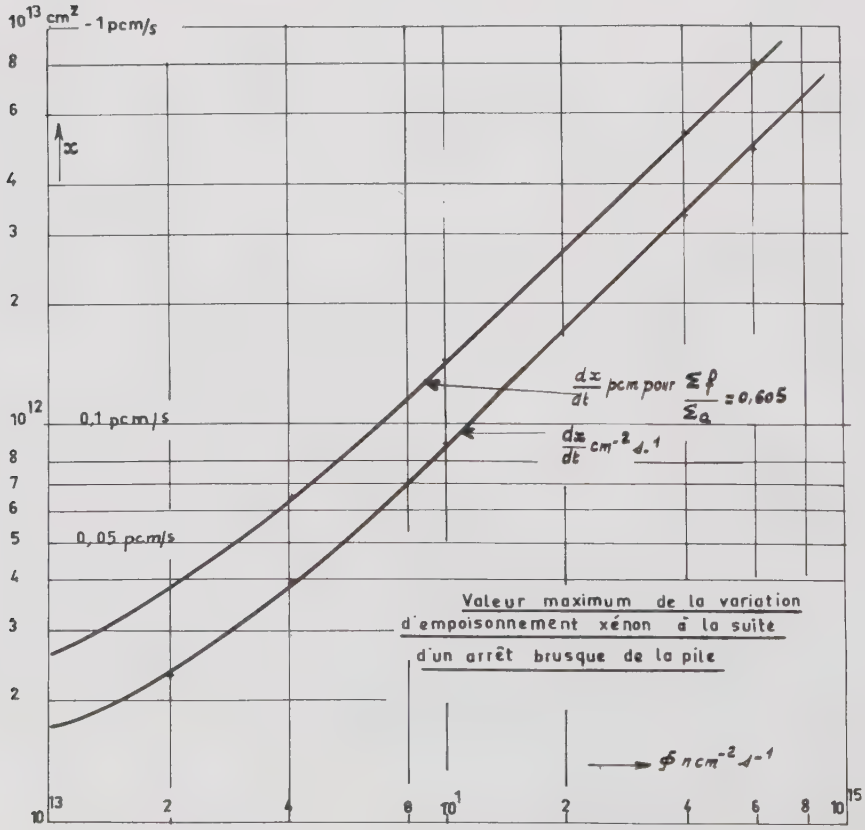


fig.: 4-17

L'expression de t'_M portée dans (4-15) conduit à :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{t'_M} = g\,\lambda_x\,\Phi_E\left(\frac{\lambda_x}{\lambda_i} - 1\right) e^{-\lambda_x t'_M} < 0 \qquad (4\text{-}22)$$

Les valeurs de $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{t'_M}$ calculées pour différentes valeurs de flux sont indiquées sur la figure 4-17. Sur cette figure on a porté une échelle p. c. m. / s dans le cas où

$$\frac{\sum_f}{\sum_a} = 0,605$$

c) Evolution de l'empoisonnement xénon dans le cas du redémarrage après arrêt brusque.

En général, le redémarrage n'a pas lieu immédiatement après l'arrêt brusque, lié le plus souvent à une chute des barres de sécurité. Avant de redémarrer un certain temps s'écoule et le problème est de savoir alors si, compte tenu de la réactivité disponible dans le coeur, ce redémarrage est possible.

Nous distinguerons trois cas :

- cas théorique démarrage brusque instantané
- démarrage suivant une loi linéaire d'évolution de flux $\Phi = \Phi_o + Dt$
- démarrage suivant une loi exponentielle d'évolution de flux $\Phi = \Phi_o\, e^{\alpha t}$

1er cas - On suppose ici qu'un certain temps après l'arrêt

brusque, le redémarrage soit instantané, c'est-à-dire que le flux passe brusquement de la valeur 0 à la valeur Φ.

L'intégration des équations (4-11) et (4-12) conduit à l'expression :

$$x = \frac{(\gamma_i + \gamma_x)\,\Phi}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi} + \frac{\lambda_i i_o - \gamma_i \Phi}{\lambda_x - \lambda_i + \sigma_2 \Phi} \; e^{-\lambda_i t} +$$

$$\left\{ x_o - \frac{\gamma_i + \gamma_x}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi}\,\Phi - \frac{\lambda_i i_o - \gamma_i \Phi}{\lambda_x - \lambda_i + \sigma_2 \Phi} \right\} e^{-(\lambda_x + \sigma_2 \Phi) t} \qquad (4\text{-}23)$$

x_o et i_o étant les valeurs de concentration xénon et iode à l'instant où le flux passe brusquement de la valeur 0 à la valeur Φ. Ces valeurs peuvent être obtenues à partir des courbes indiquées sur les figures.

L'expression (4-23) peut se mettre sous la forme :

$$x = \frac{\gamma_i + \gamma_x}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi}\,\Phi \left\{ 1 - e^{-(\lambda_x + \sigma_2 \Phi) t} \right\} +$$

$$\frac{\lambda_i x_o - \gamma_i \Phi_1}{\lambda_x - \lambda_i + \sigma_2 \Phi_1} \left\{ e^{-\lambda_i t} - e^{-(\lambda_x + \sigma_2 \Phi) t} \right\} + x_o \, e^{-(\lambda_x + \sigma_2 \Phi) t}$$

En général, le terme central est négligeable devant les deux autres et l'on montre que l'on a :

$$\frac{\gamma_i + \gamma_x}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi} \Phi \left\{ 1 - e^{-(\lambda_x + \sigma_2 \Phi) t} \right\} + x_o \, e^{-(\lambda_x + \sigma_2 \Phi) t} > x_o \qquad (4\text{-}24)$$

Cette inégalité est vérifiée quelque soit t à condition que :

$$\frac{\gamma_i + \gamma_x}{\lambda_x + \sigma_2 \Phi} \Phi > x_o$$

On peut donc dire en général que si l'on démarre brusquement la pile pour atteindre très rapidement la puissance nominale, après une période d'arrêt qui suit une chute des barres de sécurité par exemple, il faut que la valeur de l'empoisonnement xénon avant arrêt soit inférieure à celle qui correspond à l'équilibre pour que cet empoisonnement puisse alors se mettre à croître. Nous indiquons sur la figure 4-18 les évolutions de l'empoisonnement xénon dans le cas d'un démarrage très rapide pour une puissance nominale correspondant un flux Φ de 10^{14} n cm^{-2} s^{-1} une heure et une demi-heure après un arrêt rapide.

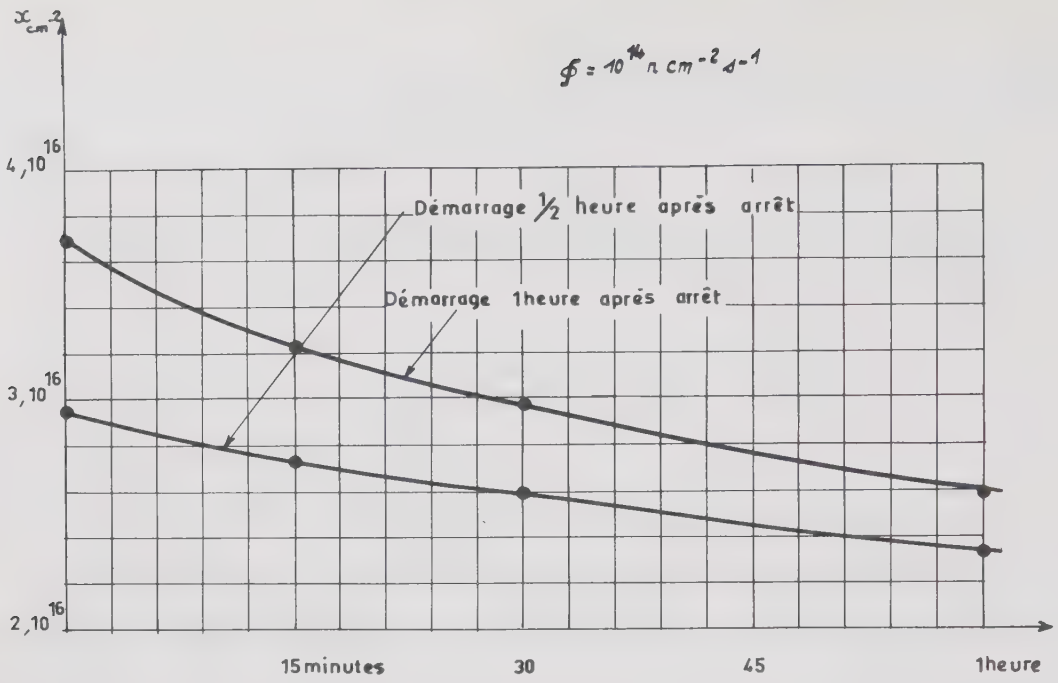
2ème cas.- On suppose ici qu'un certain temps après l'arrêt brusque, le démarrage se fait suivant une loi linéaire de variation de flux.*

Pour déterminer la loi d'évolution de l'empoisonnement xénon, il faut alors résoudre les équations :

$$\frac{dx}{dt} = \lambda_i i + \gamma_x \Phi - \lambda_x x - \sigma_2 \Phi x \qquad (4\text{-}25)$$

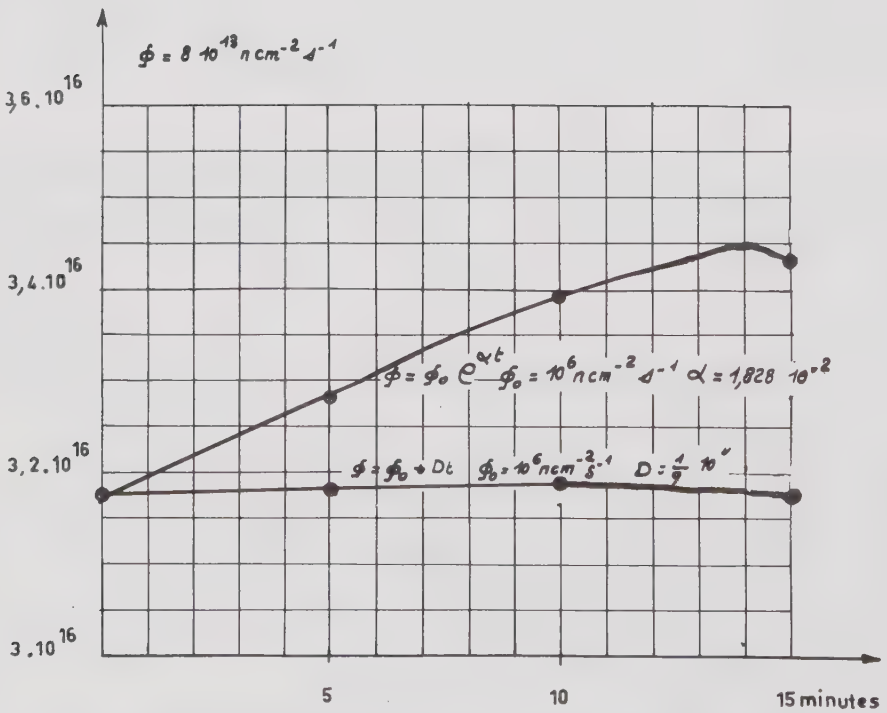
$$\frac{di}{dt} = \gamma_i \Phi - \lambda_i i \qquad (4\text{-}26)$$

* Référence [46]



Evolution de l'empoisonnement xénon après démarrage brusque à puissance nominale. 1heure et ½ heure après arrêt rapide

FIG 4-18



Evolution de l'empoisonnement xénon, pendant le démarrage
(Le démarrage ayant lieu 1heure après l'arrêt brusque)

FIG 4-19

$$\Phi = \Phi_o + Dt \qquad (4\text{-}27)$$

Les conditions initiales sont pour t = 0, $x = x_o$, $i = i_o$. Le calcul de i est immédiat et donne :

$$i = \left\{ i_o - \frac{\gamma_i}{\lambda_i} (\Phi_o - \frac{D}{\lambda_i}) \right\} e^{-\lambda_i t} + \frac{\gamma_i D}{\lambda_i} t + \frac{\gamma_i}{\lambda_i} (\Phi_o - \frac{D}{\lambda_i}) \qquad (4\text{-}28)$$

Pour avoir x, il suffit alors d'intégrer l'équation différentielle :

$$\frac{dx}{dt} = - \left[\lambda_x + \sigma_2 \Phi_o + \sigma_2 Dt \right] x + L e^{-\lambda_i t} + Mt + N \qquad (4\text{-}29)$$

avec

$$L = \lambda_i \left[i_o - \frac{\gamma_i}{\lambda_i} (\Phi_o - \frac{D}{\lambda_i}) \right]$$

$$M = D (\gamma_i + \gamma_x)$$

$$N = - \frac{\gamma_i}{\lambda_i} D + \Phi_o (\gamma_i + \gamma_x)$$

L'équation (4-29) qui est linéaire en x s'intègre en effectuant le changement de variable x = u.v et en imposant :

$$\frac{dv}{dt} = - \left[\lambda_x + \sigma_2 \Phi_o + \sigma_2 Dt \right] v$$

Ceci conduit alors à l'expression :

$$x = e^{-\left[\frac{\sigma_2 D t^2}{2} + (\lambda_x + \sigma_2 \Phi_o)t\right]} \left\{ L\sqrt{\frac{2}{\sigma_2 D}} \; e^{-\frac{(\lambda_x - \lambda_i + \sigma_2 \Phi_o)^2}{2\sigma_2 D}} \right.$$

$$\int_{z\ t=0}^{zt} e^{z^2}\, dz + \frac{M}{\sigma_2 D} \left[e^{+\frac{\sigma_2 D t^2}{2} + (\lambda_x + \sigma_2 \Phi_o)t} - 1 \right] - e^{-\frac{(\lambda_x + \sigma_2 \Phi_o)^2}{2\sigma_2 D}}$$

$$\left. \sqrt{\frac{2}{\sigma_2 D}} \; \left(\frac{M(\lambda_x + \sigma_2 \Phi_o)}{\sigma_2 D} - N \right) \int_{z_1 t=0}^{z_1 t} e^{z_1^2}\, dz_1 + x_o \right\} \qquad (4\text{-}30)$$

avec :

$$z = \sqrt{\frac{\sigma_2 D}{2}}\, t + \frac{\lambda_x + \sigma_2 \Phi_o}{\sqrt{2\sigma_2 D}}$$

$$z_1 = \sqrt{\frac{\sigma_2 D}{2}}\, t + \frac{\lambda_x - \lambda_i + \sigma_2 \Phi_o}{\sqrt{2\sigma_2 D}}$$

Dans de nombreux cas pratiques, on peut négliger Φ_o et l'équation précédente devient :

$$x = e^{-\left(\frac{\sigma_2 D}{2} t^2 + \lambda_x t\right)} \left\{ L\sqrt{\frac{2}{\sigma_2 D}} \; e^{-\frac{(\lambda_x - \lambda_i)^2}{\sigma_2 D}} \int_{zt=0}^{zt} e^{z^2}\, dz + \frac{M}{\sigma_2 D} \right.$$

$$\left. \cdot \left(e^{\sigma_2 D t^2 + \lambda_x t} - 1 \right) - e^{-\frac{\lambda_x^2}{2\sigma_2 D}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\sigma_2 D}} \left(\frac{M\lambda_x}{\sigma_2 D} - N \right) \int_{z_1 t=0}^{z_1 t} e^{z_1^2}\, dz_1 + x_o \right\} \qquad (4\text{-}31)$$

avec :

$$z = \sqrt{\frac{\sigma_2 D}{2}}\, t + \frac{\lambda_x}{\sqrt{2\sigma_2 D}}$$

$$z_1 = \sqrt{\frac{\sigma_2 D}{2}}\, t + \frac{\lambda_x - \lambda_i}{\sqrt{2\sigma_2 D}}$$

$$L = \lambda_i \left(i_o + \frac{\gamma_i D}{\lambda_i^2}\right)$$

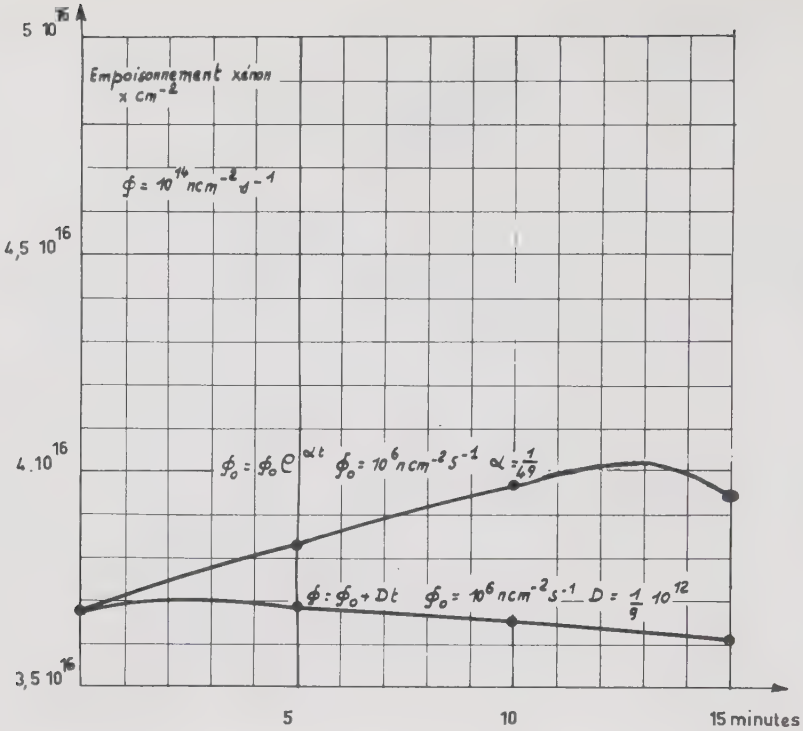
$$M = D(\gamma_i + \gamma_x) \qquad \text{et} \qquad N = \frac{\gamma_i D}{\lambda_i}$$

On a utilisé cette formule pour calculer l'évolution de l'empoisonnement xénon pendant le redémarrage (effectué en 15 minutes), une heure après l'arrêt brusque et pour des puissances de fonctionnement qui correspondent à des flux de $8\ 10^{13}$ - 10^{14} et $4\ 10^{14}$ n cm^{-2} s^{-1}. Les résultats des calculs sont indiqués sur les figures 4-19, 4-20, 4-21. On constate que la décroissance de l'empoisonnement xénon pendant le démarrage est surtout marquée pour des flux supérieurs à $8\ 10^{13}$ n cm^{-2} s^{-1}.

3ème cas - On suppose ici qu'un certain temps après l'arrêt brusque, le démarrage se fait avec une évolution de flux exponentiel.

La loi d'évolution de l'empoisonnement xénon est alors obtenue en résolvant le système d'équations :

$$\frac{dx}{dt} = \lambda_i i + \gamma_x \Phi - \lambda_x x - \sigma_2 \Phi x \qquad (4\text{-}32)$$



Evolution de l'empoisonnement xénon pendant le démarrage
(Le démarrage ayant lieu 1 heure aprés l'arrêt brusque)

FIG 4-20

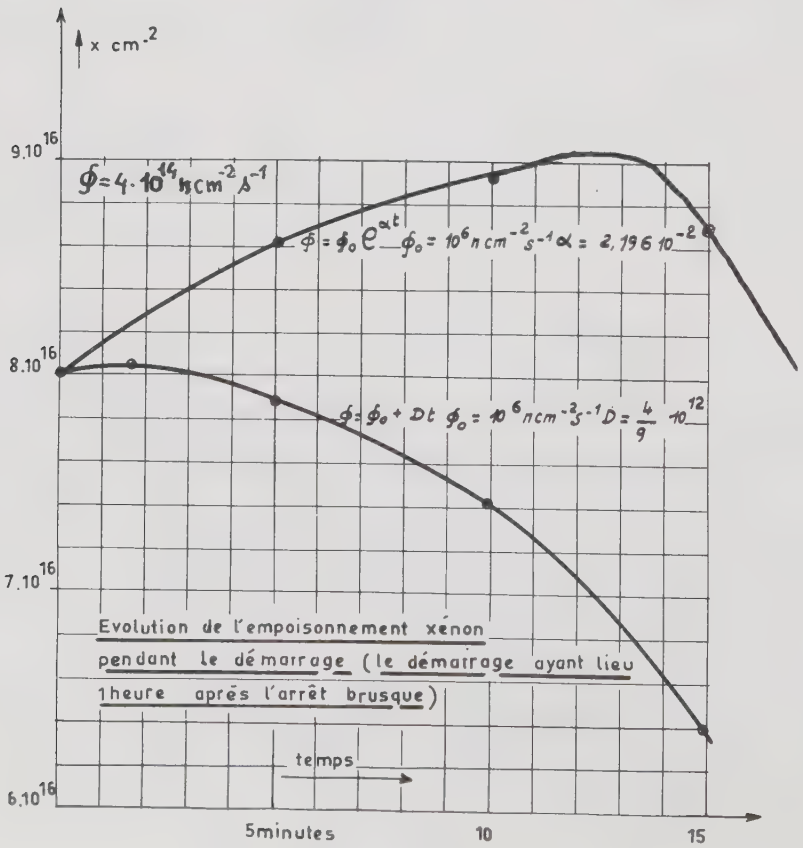


fig.: 4-21

$$\frac{di}{dt} = \gamma_i \Phi - \lambda_i i \qquad (4\text{-}33)$$

$$\Phi = \Phi_o \, e^{\alpha t} \qquad (4\text{-}34)$$

Les conditions initiales sont pour $t = 0$, $x = x_o$, $i = i_o$ $\Phi = \Phi_o$

Le calcul de i donne alors :

$$i = (i_o - \frac{\gamma_i \Phi_o}{\alpha + \lambda_i}) \, e^{-\lambda_i t} + \frac{\gamma_i \Phi_o}{\alpha + \lambda_i} \, e^{\alpha t} \qquad (4\text{-}35)$$

Le calcul de x revient à intégrer l'équation :

$$\frac{dx}{dt} + x (\lambda_x + \sigma_2 \Phi_o \, e^{\alpha t}) =$$

$$(\gamma_x + \frac{\lambda_i \gamma_i}{\alpha + \lambda_i}) \Phi_o \, e^{\alpha t} + \lambda_i (i_o - \frac{\gamma_i \Phi_o}{\alpha + \lambda_i}) \, e^{-\lambda_i t} \qquad (4\text{-}36)$$

L'équation (4-36) étant linéaire en x ne peut s'intégrer qu'en effectuant le changement de variables $x = uv$, en imposant

$$\frac{dv}{dt} = - (\lambda_x + \sigma_2 \Phi_o \, e^{\alpha t}) \cdot v$$

Il suffit alors d'intégrer :

$$\frac{du}{dt} = (\gamma_x + \frac{\lambda_i \gamma_i}{\alpha + \lambda_i}) \Phi_o \, e^{(\alpha + \lambda_x) t + \frac{\sigma_2 \Phi_o}{2} e^{\alpha t}} + \lambda_i (i_o - \frac{\gamma_i \Phi_o}{\alpha + \lambda_i})$$

$$e^{-(\lambda_i - \lambda_x) t + \frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha} e^{\alpha t}} \qquad (4\text{-}37)$$

$\frac{a}{\alpha} \neq 1$ et $1 - \frac{a}{\alpha} \neq 0$.

On a alors $K_1(z) \neq \frac{1}{\alpha d} \int_b^z e^z \, dz$ qui s'intègre et donne :

$$K_1(z) = \frac{1}{\sigma_2 \Phi_o} \left\{ e^{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha} e^{\alpha t}} - e^{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha}} \right\} \qquad (4\text{-}40)$$

on a de même :

$$1 + \frac{c}{\alpha} = 1 + \frac{\lambda_i - \lambda_x}{\alpha} \simeq 1 \quad \text{et} \quad \frac{c}{\alpha} \neq 0$$

ce qui entraîne :

$$K_2(z) = \frac{1}{\alpha} \int_{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha}}^{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha} e^{\alpha t}} \frac{e^z}{z} \, dz \qquad (4\text{-}41)$$

$\int \frac{e^z}{z} dz$ est une fonction tabulée, mais lorsque $\sigma_2 \Phi_o e^{\alpha t} \ll \alpha$

on peut poser :

$$K_2(z) = \frac{1}{\alpha} \int_{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha}}^{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha} e^{\alpha t}} \frac{1}{z} \, dz$$

c'est-à-dire $K_2(z) = \frac{1}{\alpha} \left[L|z| \right]_{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha}}^{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha} e^{\alpha t}}$

En posant :

$$\alpha + \lambda_x = a \qquad \frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha} = d \qquad \lambda_i - \lambda_x = c \qquad A = i_o - \frac{\gamma_i \Phi_o}{\alpha + \lambda_i}$$

(4-37) peut s'écrire :

$$\frac{du}{dt} = \left(\frac{\gamma_i \lambda_i}{\alpha + \lambda_i} + \gamma_x\right) \Phi_o e^{at + d e^{\alpha t}} + A \lambda_i e^{-ct + d e^{\alpha t}} \qquad (4\text{-}38)$$

En posant :

$$K_1(z) = \int_o^t e^{at + d e^{\alpha t}} dt = \frac{1}{\alpha d^{(\frac{a}{\alpha})}} \int_d^z \frac{e^z}{z^{(1-\frac{c}{\alpha})}} dz \quad \text{avec} \quad z = d e^{\alpha t}$$

$$K_2(z) = \int_o^t e^{-ct + d e^{\alpha t}} dt = \frac{1}{\alpha d^{-(\frac{c}{\alpha})}} \int_d^z \frac{e^z}{z^{(1+\frac{c}{\alpha})}} dz \quad \text{avec} \quad z = d e^{\alpha t}$$

L'expression de x devient :

$$x = \left\{ \left(\frac{\lambda_i \gamma_i}{\alpha + \lambda_i} + \gamma_x\right) \Phi_o K_1(z) + \lambda_i \left(i_o - \frac{\gamma_i \Phi_o}{\alpha + \lambda_i}\right) K_2(z) + x_o e^{\frac{\sigma_2 \Phi}{2}} \right\} e^{-\left(\lambda_x t + \frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha} e^{\alpha t}\right)} \qquad (4\text{-}39)$$

Pour les cas pratiques des approximations permettent de calculer facilement $K_1(z)$ et $K_2(z)$. En effet $a = \alpha + \lambda_x$ et $1 - \frac{a}{\alpha} = \frac{\lambda_x}{\alpha}$ de sorte que lorsque α correspond à une période de plusieurs secondes,

et x est alors donné par l'expression simple :

$$x = \left\{ \left(\frac{\lambda_i \gamma_i}{\alpha + \lambda_i} + \gamma_x \right) \frac{1}{\sigma_2} \left(e^{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha} e^{\alpha t}} - e^{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha}} \right) + \lambda_i \left(i_o - \frac{\gamma_i \Phi_o}{\alpha + \lambda_i} \right) t + x_o e^{\frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha}} \right\} e^{-\left(\lambda_x t + \frac{\sigma_2 \Phi_o}{\alpha} e^{\alpha t} \right)} \qquad (4\text{-}42)$$

Nous avons utilisé cette formule pour calculer l'évolution de l'empoisonnement xénon pendant le redémarrage en 15 minutes (suivant une variation de flux exponentielle) une heure après l'arrêt brusque pour des puissances de fonctionnement correspondant à des flux de $8\ 10^{13}$ - 10^{14} - $4\ 10^{14}$ n cm^{-2} s^{-1}. Les résultats de ces calculs sont indiqués sur les figures 4-19, 4-20, 4-21.

On constate que la variation de l'empoisonnement xénon en fonction du temps est très différente de celle obtenue pour une variation linéaire de flux. La consommation du xénon est beaucoup plus importante dans le premier cas, en effet au même instant t, la quantité de neutrons libérés étant plus grande, la quantité de xénon brûlé est plus importante.

On voit donc que pendant les démarrages qui se produisent après un arrêt brusque du fonctionnement de la pile, la vitesse moyenne de l'empoisonnement xénon est toujours plus faible que celle qui existe à l'instant initial où débute l'opération de démarrage. Cette vitesse change même de signe dans le cas de flux $> 10^{14}$ n cm^{-2} s^{-1} et pour une montée en puissance assez rapide. Ceci semble favorable du point de vue redémarrage en fin de cycle, étant donné la faible marge de réactivité dont on dispose. Les formules établies sont relativement faciles

à appliquer et permettent de définir la vitesse de libération de réactivité pour pouvoir satisfaire au redémarrage sans être gêné par l'empoisonnement xénon.

Chapitre V

INFLUENCE DU RETARD DU FONCTIONNEMENT DES SECURITES SUR LES CONSEQUENCES DE L'ACCIDENT LIE A UNE LIBERATION EXCESSIVE DE REACTIVITE.

Le fonctionnement des sécurités en régime d'accident doit permettre l'arrêt de la réaction en chaîne par l'introduction dans le coeur pile d'une certaine quantité d'antiréactivité selon l'urgence de la situation à laquelle il faut parer. On dispose généralement de 4 moyens d'arrêt* :

a) Augmentation de l'absorption parasite.
b) Augmentation des fuites de neutrons.
c) Diminution de la modération.
d) Diminution du combustible contenu dans le coeur.

a) Les absorbeurs.

La plupart des moyens d'arrêt sont de ce type. Ils se composent le plus souvent de barres rigides de matériau absorbant : cadmium, carbure de bore, hafnium, etc.... qui sont introduites dans le coeur lorsqu'un signal est fourni, automatiquement ou manuellement.

En général, les absorbeurs parasites sont stockés à l'extérieur du coeur et ils doivent être transportés à l'intérieur du coeur ou du réflecteur.

* Référence [47]

S'ils sont stockés à l'intérieur du coeur, ils ne pourront être efficaces que par un changement de géométrie, mais il y a toujours ainsi une perte de réactivité par stockage. Les systèmes à billes consistent à projeter à l'intérieur du coeur des billes de bore dans des logements préalablement aménagés et destinés en principe à recevoir les barres de sécurité.

On les utilise surtout comme moyen de secours lorsque les barres de sécurité et de contrôle ne peuvent être enfoncées dans le coeur pile. Ils ont en général un temps de réponse élevé.

Les poisons liquides se développent de plus en plus, ils sont normalement introduits dans des modérateurs liquides ou dans certains fluides réfrigérants. Une fois introduits, il faut pouvoir aussi les retirer. Cette opération est facile avec les sels de cadmium, bore, lithium qui peuvent être extraits des solutions de modérateur aqueux au moyen de résines.

Pour les piles de puissance en dehors de l'acide borique, on envisage d'utiliser des sels de bore. Pour les piles rapides, étant donné leur temps d'introduction, les poisons liquides ne sont pas très efficaces, aussi on ne les utilise qu'en dernière ressource.

La pression du fluide réfrigérant ou modérateur est souvent un obstacle sérieux à l'introduction des poisons dans le coeur pile.

b) Augmentation des fuites de neutrons.

On augmente ces fuites par déplacement du réflecteur. Une partie du réflecteur est prévue mobile, sur plusieurs piles rapides. Sur certaines

la chute par gravité du fond du matériau réflecteur est possible : c'est le cas du "Fast Reactor" de Los Alamos où le matériau réflecteur est de l'uranium naturel. Sur la pile rapide anglaise "Zephyr" un déplacement pneumatique d'une partie latérale du réflecteur est possible.

c) Diminution de la modération.

Ce moyen est utilisé dans plusieurs piles de puissance où l'on réalise la vidange rapide du liquide modérateur. Pour les liquides à haut pouvoir modérateur tels que l'eau lourde, on sait qu'un changement relatif faible du niveau est suffisant pour rendre la pile sous critique

d) Diminution du chargement en combustible.

Pour les piles à modérateur liquide ou à solution homogène de combustible solide, il est assez facile de prévoir la vidange de la solution dans un ou plusieurs réservoirs. Si pour certains incidents de piles à combustible solide, la fusion des éléments combustibles est possible, il est nécessaire d'obliger le liquide de fusion à se répartir par gravité en une géométrie non critique. C'est ce qui a été envisagé pour le réacteur rapide Américain E. Fermi et le futur rapide Français : Rapsodie.

La mise en oeuvre de ces 4 moyens d'arrêt nécessite toujours la libération d'une énergie emmagasinée. Cette énergie est utilisée le plus souvent à propulser ou éparpiller les matériaux absorbants. Elle peut être mécanique ou gravitique comme pour la propulsion classique des barres de sécurité. Elle peut être aussi pneumatique : un gaz

comprimé propulse le poison préalablement comprimé dans une enceinte près du coeur. De plus le gaz de propulsion peut être un poison (BF 3 par exemple). Dans certains cas l'énergie peut être d'origine chimique : petite charge explosive utilisée pour propulser le poison.

Le plus fréquemment, la chute des barres est provoquée par un signal électrique émis, dès dépassement du niveau de puissance, période, excès de température, etc... Il y a un temps mort entre le moment où le dépassement de niveau fixé a lieu et le moment où les barres commencent à se déplacer. De plus, il faut qu'une certaine quantité d'antiréactivité soit insérée par les barres de sécurité avant que la puissance ne commence à décroître.

Sur la figure 5-1, on a indiqué l'efficacité d'une barre de sécurité, compte tenu de sa position dans le coeur (dans le cas d'une chute par gravité) et de sa loi d'efficacité neutronique.

La puissance maxima atteinte dépasse souvent la puissance de déclenchement, on admet le plus souvent la relation :

$$P_{max} = K\, P_{déclenchement}$$

où K est une fonction de la période de la pile, du système de déclenchement, de la valeur des barres et de leur efficacité.* Mais ce qui est important pour la protection de l'installation, c'est l'énergie ou l'évolution de la puissance de la pile en fonction du temps à partir duquel la puissance de déclenchement a été dépassée.

* Référence [48]

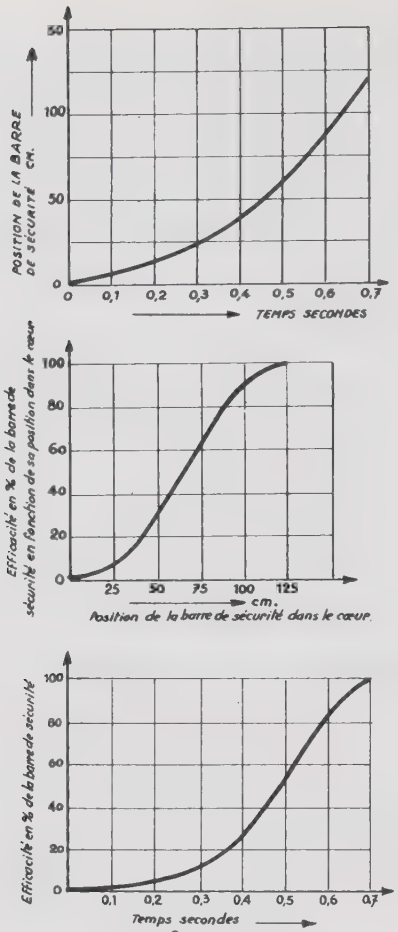

POSITION DE LA BARRE DE SÉCURITÉ CM.
50
100
50
0
0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7
TEMPS SECONDES
Efficacité en % de la barre de sécurité en fonction de sa position dans le cœur
100
80
60
40
20
0
25 50 75 100 125
cm.
Position de la barre de sécurité dans le cœur
Efficacité en % de la barre de sécurité
100
80
60
40
20
0
0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7
Temps secondes

fig.: 5-1

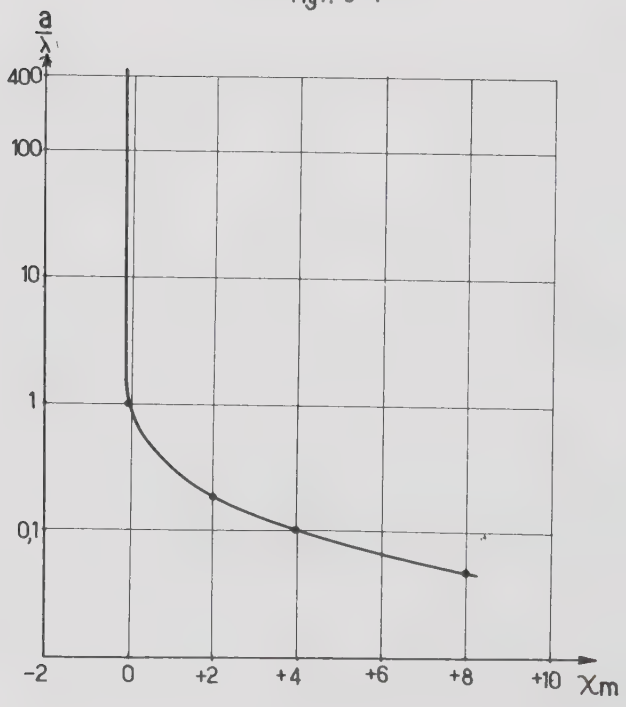

a/λ
400
100
10
1
0,1
-2 0 +2 +4 +6 +8 +10 Xm

fig.: 5-2

5.1. Saut brusque de réactivité.

Nous allons ici évaluer l'effet de l'injection des barres de sécurité dans une pile dont la puissance évolue par suite d'un saut > 0 de réactivité.

On peut écrire, à partir des équations cinétiques à un seul groupe de neutrons retardés :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho(1 - \beta) - \beta}{\theta} n + \lambda C \qquad (5\text{-}1)$$

d'où :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = \frac{\rho(1 - \beta) - \beta}{\theta} + \lambda \frac{C}{n}$$

et approximativement *

$$T \simeq \frac{\theta}{(\rho - \beta) + \lambda \theta \frac{C}{n}} \qquad (5\text{-}2)$$

Cette expression permet de calculer la période T à chaque instant, si l'on connaît ρ et le rapport $\frac{C}{n}$.

Pour connaître la limite de l'excursion de puissance, il suffit de calculer la période infinie, c'est-à-dire d'annuler le dénominateur de la relation (5-2) où ρ représente la somme $\delta k_p + \delta k_b$.

δk_p étant la réactivité positive cause de l'excursion de puissance, et δk_b l'antiréactivité destinée à limiter momentanément cette excursion de puissance.

* Référence [27]

Pour t positif et assez grand, on a, d'après (3-21)

$$\frac{C}{n} = \frac{\beta}{\theta\,(\omega_o + \lambda)}$$

En portant cette valeur dans (5-2), on aura :

$$T = \frac{\theta}{\rho - \dfrac{\beta\ \omega_o}{\omega_o + \lambda}} \qquad (5\text{-}3)$$

Pour que T soit infini, il faut annuler le dénominateur de (5-3), ce qui entraîne :

$$\delta k_p - \delta k_b = \frac{\omega_o}{\omega_o + \lambda}\ \beta \qquad (5\text{-}4)$$

Si $\delta k_p < \beta$, on voit d'après (5-4) que δk_b est très petit. On peut alors calculer δk_p à l'aide de

$$T = \frac{\beta - \delta k_p}{\delta k_p \,.\, \lambda}$$

ce qui conduit alors à :

$$\delta k_b = \frac{\delta k_p\ \lambda\theta}{\beta - \delta k_p} \qquad (5\text{-}5)$$

Exemple : Pour $\lambda = 7,7 \,.\, 10^{-2}$, $\theta = 10^{-3}$ s, $\delta k_p = 0,2\ \beta$, on a $\delta k_b = 1,5 \,.\, 10^{-2}\ \delta k_p$.

On voit que δk_b est beaucoup plus petit que δk_p, et qu'avec très peu d'antiréactivité, on stabilise momentanément la puissance.

On peut également calculer l'évolution de puissance, lorsqu'à partir d'un certain moment, on insère linéairement de l'antiréactivité dans la pile.

On supposera que cette insertion se fasse suivant la loi :

$$\frac{d\ \delta k_b}{dt} = - a\ \ \delta k_p$$

d'où $$\delta k\ (t) = \delta k_p\ (1 - at)$$

Si on linéarise les expressions de n et C à partir de l'instant t = 0, où $n = n_o$ et $C = C_o$, pour t petit, on aura le système :

$$n\ (t) = n_o + n\ (t)$$
$$C\ (t) = C_o + c\ \ (t)$$

On admet que n (t) et c (t) sont de petites variations autour de n_o et C_o. En portant ces expressions dans (3-3) et (3-4), on obtient :

$$\frac{1}{\lambda}\left[\frac{d^2_n\ (t)}{dt^2} + \frac{\beta}{\theta}\ \frac{dn\ (t)}{dt}\right] = \frac{n_o}{\theta}\left[\frac{1}{\lambda}\ \ \frac{d\ \delta k\ (t)}{dt} + \delta k\ (t)\right] \qquad (5\text{-}6)$$

en supposant $\delta k\ (t)$ petit et en admettant $\delta k\ (t) . n\ (t) = 0$ et

$\frac{d\ \delta k\ (t)}{dt} . n\ (t) = 0$

En prenant la transformée de Laplace de la relation précédente, et en tenant compte des conditions initiales :

$$\frac{dn\ (t)}{dt} = \frac{n_o\ \ \delta k_p\ \lambda}{\beta} \qquad \text{et } n\ (t) = 0 \quad \text{pour } t = 0$$

On aura :

$$\frac{p_n(p)}{\lambda}\left(p+\frac{\beta}{\theta}\right) = n_o\,\delta k_p\left[\frac{1}{\beta}+\frac{1-\frac{a}{\lambda}}{\theta\,.\,p}+\frac{a}{\theta\,.\,p^2}\right] \qquad (5\text{-}7)$$

ce qui conduit à :

$$\frac{n(p)}{n_o\,\delta k_p\,\lambda} = \frac{a\,\theta}{\lambda\beta^2}\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{p+\frac{\beta}{\theta}}\right)+\frac{1-\frac{a}{\lambda}}{\beta\,p^2}-\frac{a\,\theta^2}{\beta^3}\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{p+\frac{\beta}{\theta}}\right)$$

$$+\frac{a\,\theta}{\beta^2\,p^2}-\frac{a}{\beta\,p^3} \qquad (5\text{-}8)$$

ou encore :

$$n(t) = n_o\left[1+\frac{a\,\theta\,\delta k_p}{\beta^2}\left(1-e^{-\frac{\beta}{\theta}t}\right)+\frac{(\lambda-a)\,\delta k_p}{\beta}t-\frac{a\,\lambda\,\theta^2\,\delta k_p}{\beta^3}\right.$$

$$\left.\left(1-e^{-\frac{\beta}{\theta}t}\right)+\frac{a\,\lambda\,\theta\,\delta k_p}{\beta^2}t-\frac{a\lambda\,\delta k_p\,t^2}{2\beta}\right] \qquad (5\text{-}9)$$

On peut, à partir de cette relation déterminer l'instant t_m où n (t) prend sa valeur maximum n_m.

n_m peut se mettre sous la forme :

$$\frac{n_m}{n_o} = 1+\frac{\delta k_p}{\beta}\,\chi_m$$

On indique sur la figure 5-2 les valeurs de χ_m en fonction de $\frac{a}{\lambda}$.

On constatera qu'à partir d'une certaine vitesse a d'insertion d'antiréactivité, χ_m est indépendant de a : On n'a donc pas intérêt à augmenter cette vitesse indéfiniment pour diminuer n_m.

On a représenté sur la figure 5-3, l'évolution de puissance d'un empilement critique, tel RUBEOLE II, à la suite d'un saut de réactivité de 0,2 β = 128 p. c. m. On a supposé qu'à partir du dépassement 5. 10^6 n / cm^2 / s, s'écoulaient 3 secondes avant que les barres de sécurité ne commencent à chuter. On a calculé l'influence de cette chute de barres de deux façons : soit insertion de - 8 000 p. c. m. en 2 secondes, soit - 400 p. c. m. en 2 secondes également.

Lorsque la pile est critique en neutrons prompts, il suffit, pour déterminer l'antiréactivité qui limite l'excursion de puissance, d'utiliser la relation (5-3) qui donne :

$$\delta k_b = \delta k_p - \frac{\omega_o}{\omega_o + \lambda} \beta$$

et comme $\omega_o \gg \lambda$, on retrouve l'expression bien connue :

$$\delta k_b = \delta k_p - \beta$$

On peut alors essayer de déterminer le pic de puissance atteint lorsque l'antiréactivité varie linéairement. La pile étant critique en neutrons prompts, on peut négliger les neutrons retardés et écrire :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k_p - \beta}{\theta} n \qquad (5\text{-}10)$$

Si, à partir de l'instant t = 0 où $n = n_o$, la vitesse d'insertion d'antiréactivité est a / p. c. m. / seconde, on a :

* Référence [49]

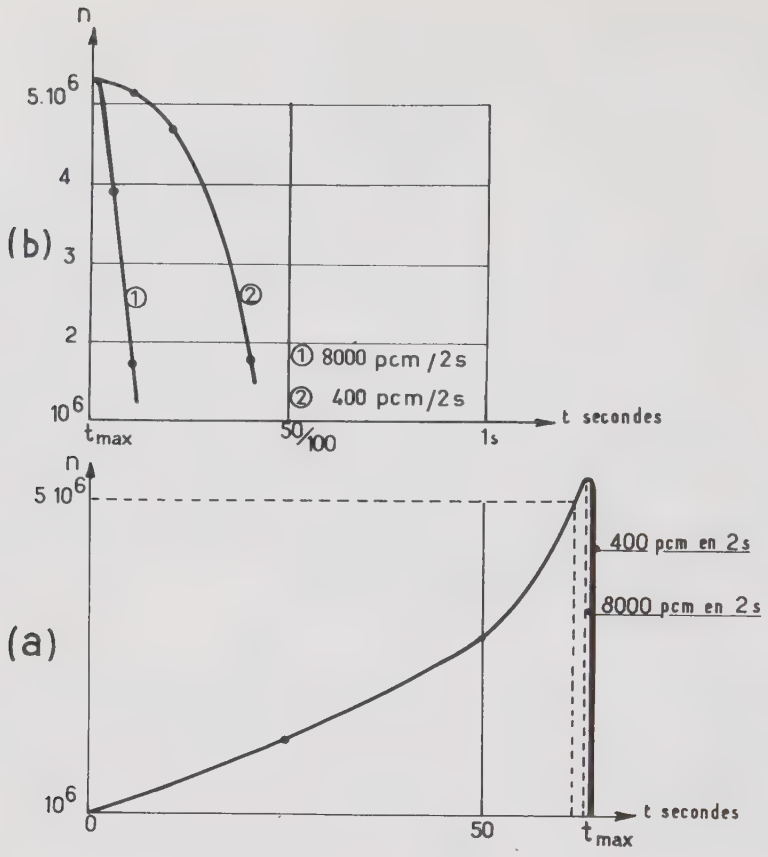

n
5.10^6
4
(b) 3
2
10^6
t_max
50/100
1s
t secondes
① 8000 pcm /2s
② 400 pcm/2s
n
5 10^6
(a)
10^6
0
50
t_max
t secondes
400 pcm en 2s
8000 pcm en 2s

fig.: 5–3

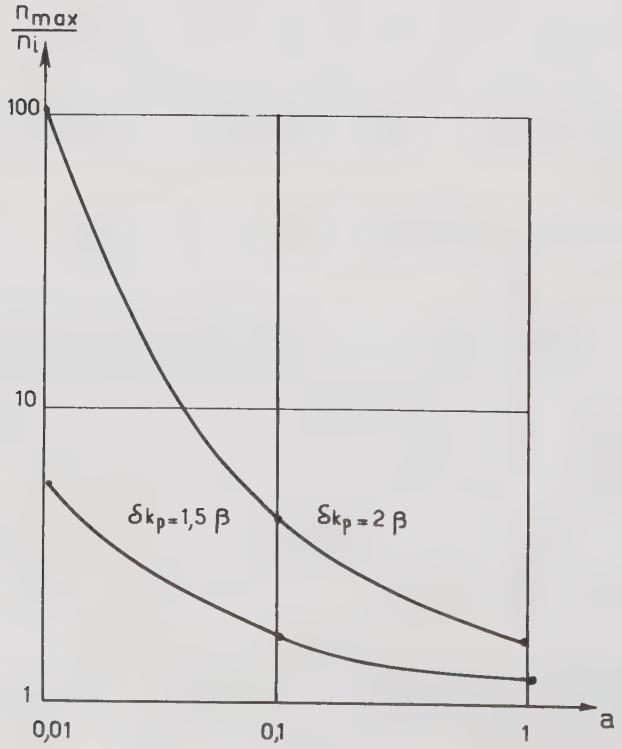

n_max / n_i
100
10
1
0,01
0,1
1
a
δk_p=1,5 β
δk_p=2 β

fig.: 5–4

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k_p - \beta - at}{\theta} n$$

d'où

$$\text{Log} \frac{n_{max}}{n_o} = \frac{(\delta k_p - \beta)^2}{2 a \theta}$$

On remarquera que n_{max} est d'autant plus voisin de n_o que a est grand (cf. figure 5-4). Ainsi, lorsque la pile est critique en neutrons prompts, il faut, pour limiter au plus vite l'excursion de puissance, introduire l'antiréactivité dans le coeur le plus rapidement possible.

Dans le cas de chute de barres par gravité, la loi d'insertion est de la forme $-\frac{b}{2} t^2$ (b exprimé en réactivité s^{-2}).

La relation (5-10) s'écrit alors :

$$\frac{dn}{dt} = \left(\frac{\delta k_p - \beta}{\theta} - \frac{b t^2}{2 \theta}\right) n$$

En satisfaisant aux conditions initiales ou $n = n_o$ au temps $t = 0$, le maximum de l'excursion de puissance est défini par :

$$\text{Log} \frac{n_{max}}{n_o} = \frac{2 \sqrt{2} (\delta k_p - \beta)^{3/2}}{3 \theta \sqrt{b}} \qquad (5\text{-}11)$$

On montre sur la figure 5-5, l'évolution de puissance d'un empilement critique (uranium légèrement enrichi - glucine) pour un saut de réactivité de 1,5 β. A partir d'un certain flux et avec un certain retard, les quatre barres de sécurité chutent selon une loi parabolique

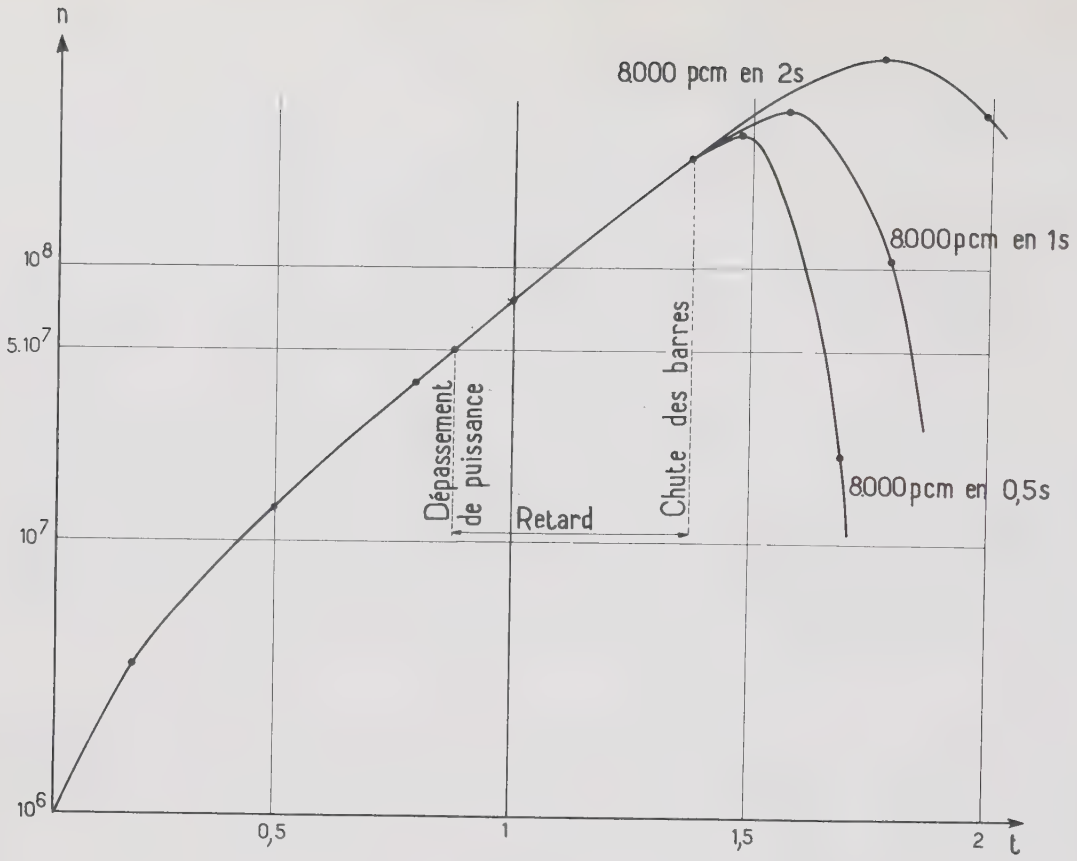
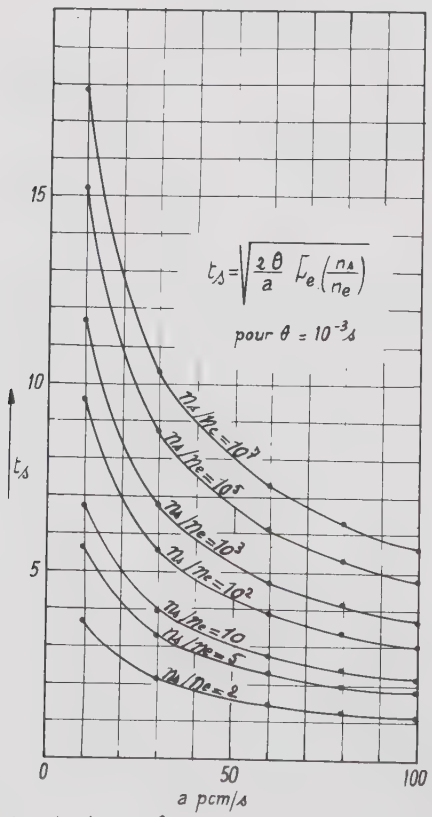


fig.: 5-5



Variation de t_s en fonction de la vitesse de libération de réactivité pour différentes valeurs de $\frac{n_s}{n_e}$.

FIG.: 5-6

avec des temps différents. On constatera que le pic de puissance est d'autant moins élevé que la chute est plus rapide.

5.2. Variation linéaire de réactivité.

Nous nous placerons encore ici dans le cas où la pile est critique en neutrons prompts de façon à simplifier les calculs.*

Nous supposerons de plus que la réactivité variant linéairement l'échelle des temps a été choisie de façon à pouvoir définir l'évolution de la puissance par la relation :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{at}{\theta} n \qquad (5\text{-}12)$$

Si n_o est la puissance initiale pour $t = 0$, et n_s la puissance qui correspond à la sécurité de niveau puissance, le temps nécessaire pour atteindre n_s est :

$$t_s = \sqrt{\frac{2\theta}{a} L_e \left(\frac{n_s}{n_e}\right)} \qquad (5\text{-}13)$$

Sur la figure 5-6, est indiquée la variation de t_s en fonction de la vitesse de libération de réactivité pour différentes valeurs du rapport n_s / n_e et pour une valeur de θ fixée à 10^{-3} s.

Si l'on suppose qu'avec un retard t_d, les barres de sécurité sont introduites par gravité dans le coeur de la pile suivant une loi en $-\frac{b}{2} t'^2$ à partir de t_d on a :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n}{\theta} \left\{ a (t_s + t_d + t') - \frac{b}{2} t'^2 \right\} \qquad (5\text{-}14)$$

* Référence [50]

a étant exprimé en p.c.m./s et b en p.c.m./s^2.

La puissance maximum est atteinte pour la valeur de t' qui annule $\frac{dn}{dt}$ soit :

$$-\frac{b}{2}t'^2 + at' + a(t_s + t_d) = 0$$

soit $$t' = \frac{a + \sqrt{a^2 + 2ab(t_s + t_d)}}{b}$$

En général, on a toujours $t_s + t_d \gg \frac{a}{b}$ ce qui conduit à

$$t' \simeq \sqrt{\frac{2a}{b}(t_s + t_d)}$$

et en portant cette valeur de t' dans l'expression $L\left|\frac{n_{max}}{n_R}\right|$ on a :

$$L\left|\frac{n_{max}}{n_R}\right| = \frac{a}{\theta}(t_s + t_d)\left\{\frac{a}{b} + \frac{2}{3}\sqrt{\frac{2a}{b}(t_s + t_d)}\right\} \qquad (5\text{-}15)$$

et comme $L\left|\frac{n_R}{n_o}\right| = \frac{a}{\theta}\frac{(t_s + t_d)^2}{2}$ on a :

$$L\left|\frac{n_{max}}{n_o}\right| = \frac{a}{\theta}(t_s + t_d)\left\{\frac{t_s + t_d}{2} + \frac{a}{b} + \frac{2}{3}\sqrt{\frac{2a}{b}(t_s + t_d)}\right\} \qquad (5\text{-}16)$$

Sur la figure 5-7, nous avons tracé les variations du rapport n_{max}/n_o en fonction de différentes vitesses de libération de réactivité pour $\theta = 10^{-3}$ s et en admettant pour b une injection d'antiréactivité

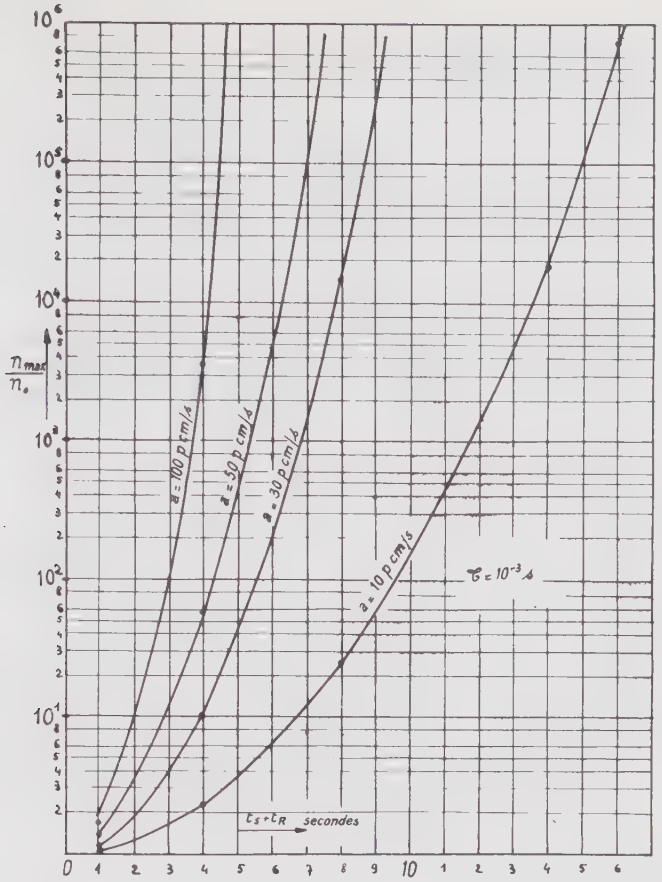

$\frac{n_{max}}{n_o}$
a = 100 p cm/s
a = 50 p cm/s
a = 30 p cm/s
a = 10 p cm/s
$\tau = 10^{-3}$ s
$t_s + t_R$ secondes

FIG.: 5-7

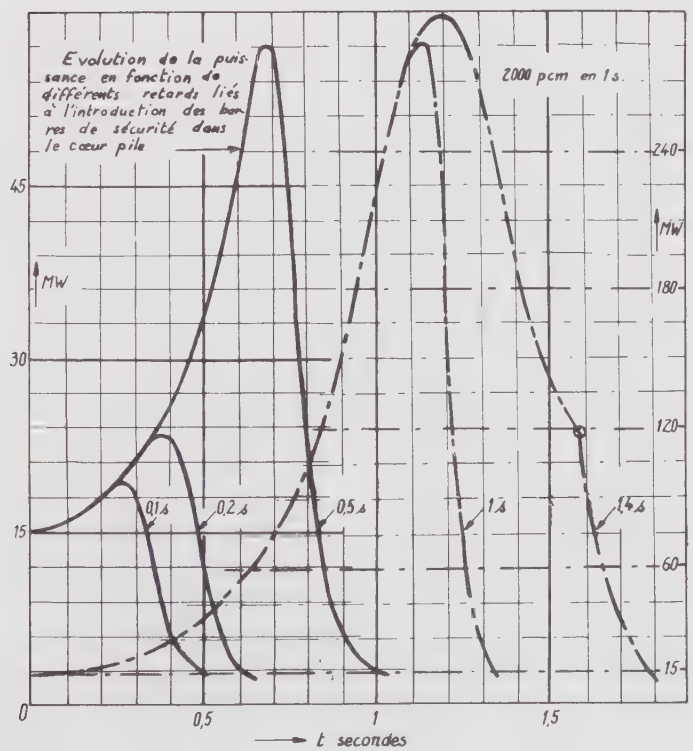

Evolution de la puissance en fonction de différents retards liés à l'introduction des barres de sécurité dans le cœur pile
2000 pcm en 1 s.
MW
MW
0,1 s
0,2 s
0,5 s
1 s
1,4 s
t secondes

FIG.: 5-8

de 10 000 p.c.m. en 3/10 seconde.

Dans le cas où l'on veut tenir compte des effets thermiques, les approximations à faire sont plus difficiles. Nous allons donner ici les résultats de calcul relatif à une pile du type uranium faiblement enrichi eau lourde. Pour calculer l'évolution de la puissance en régime d'accident, les équations utilisées sont celles du paragraphe 3.2.

Les courbes de la figure 5-8 représentent l'évolution de la puissance de la pile dans le cas d'une insertion de réactivité de 2 000 p.c.m. en 2 secondes à partir d'une puissance stable de 15 MW.* La sécurité niveau de puissance est règlée à 16,5 MW et les barres de sécurité sont introduites dans le coeur avec des retards compris entre 0,1 et 1,4 seconde. On constate que le maximum de puissance atteinte augmente très vite avec ce retard, et que même pour le retard de 1,4 seconde, le coefficient de température du combustible agit avant les barres de sécurité.

Les courbes de la figure 5-9 représentent les mêmes évolutions en puissance dans le cas d'une insertion de réactivité de 2 000 p.c.m. en 2 secondes.

Celles de la figure 5-10 sont liées au fonctionnement de la sécurité période ($\frac{1}{p}\ \frac{dp}{dt}$ a été pris égal à 1/20).

Les courbes de la figure 5-11 représentent l'évolution de la puissance de la même pile dans le cas d'une libération de réactivité de 70 p.c.m./s. La puissance initiale de la pile est de 10 MW et la sécurité de niveau est réglée à 12 MW.** On constate dans ce cas que le maximum de puissance atteinte n'est pas très important même lorsque les barres de sécurité sont introduites dans le coeur avec un retard de 2 secondes.

* Référence [25] ** Référence [24]

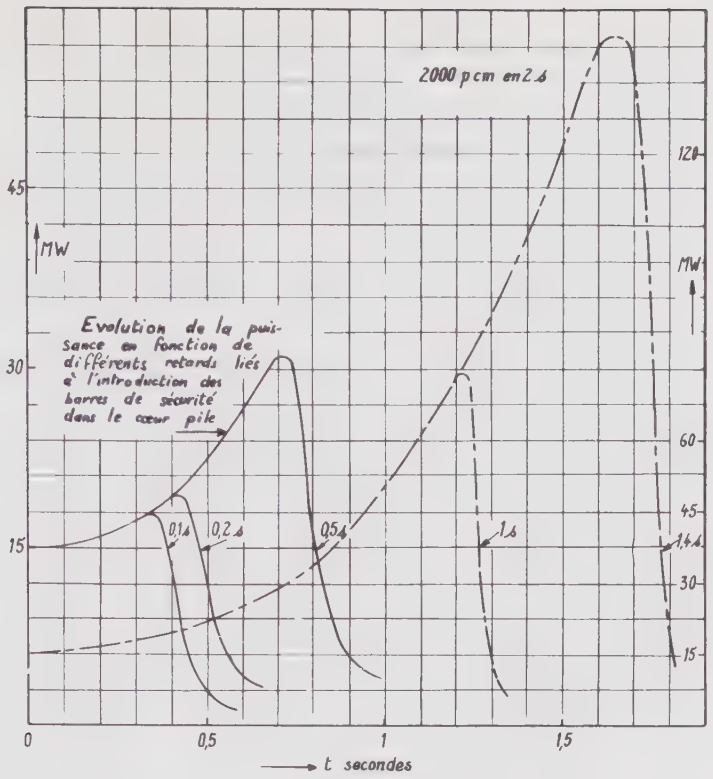


FIG. : 5-9

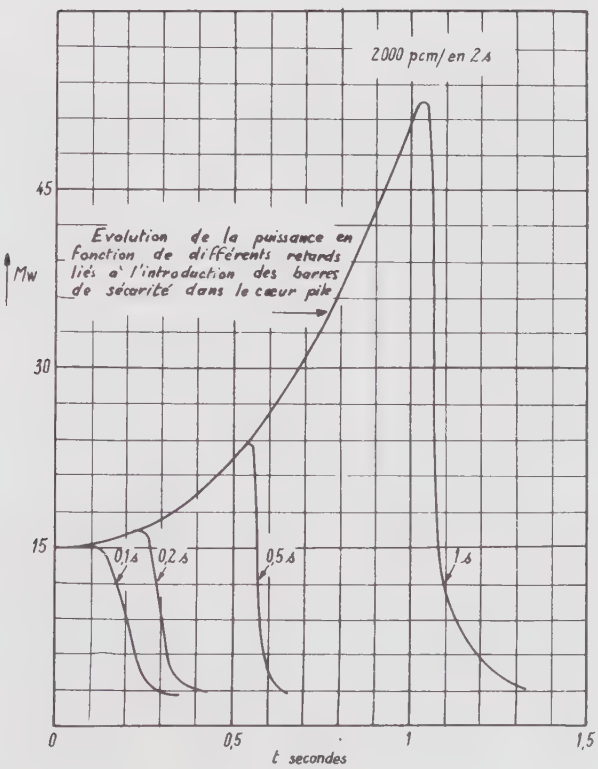


FIG. : 5-10

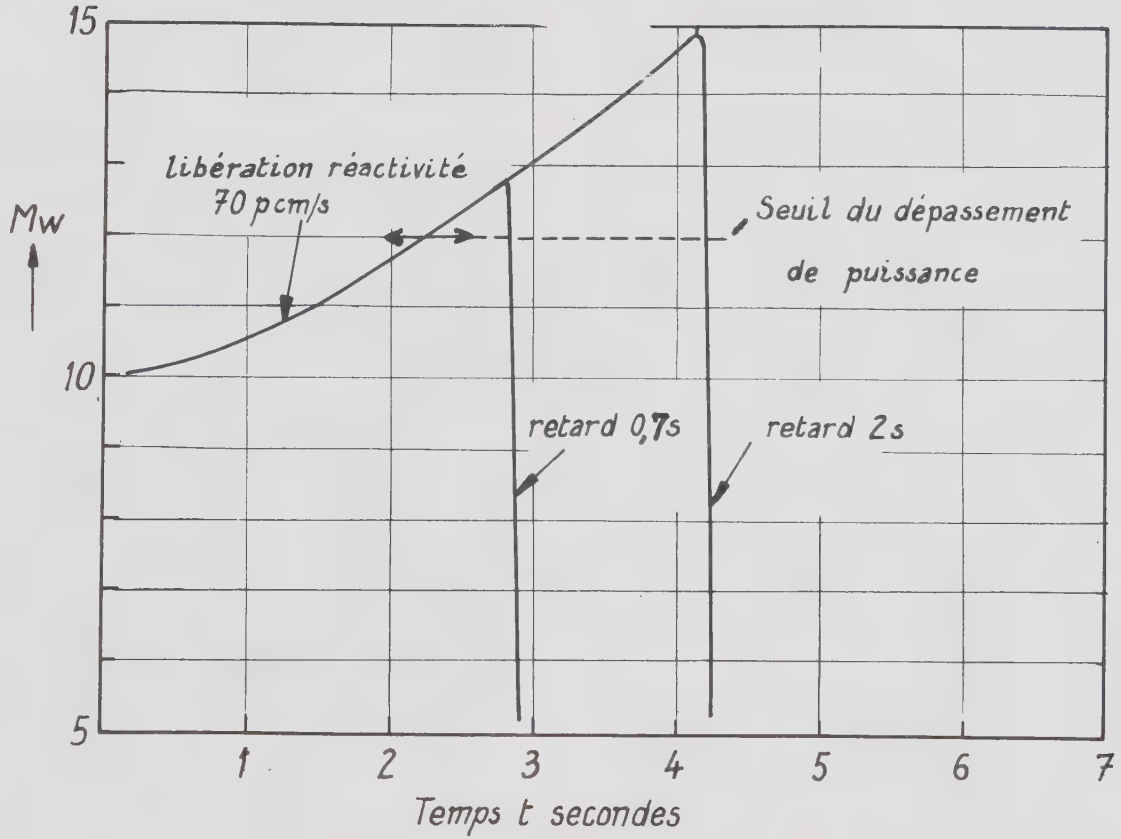

15
10
5
Mw
libération réactivité
70 pcm/s
Seuil du dépassement
de puissance
retard 0,7s
retard 2s
1
2
3
4
5
6
7
Temps t secondes

FIG. : 5-11

Chapitre VI

ACCIDENT DE REFRIGERATION.

On a vu que pour les piles atomiques de puissance en dehors des excursions de puissance, l'incident le plus grave est l'arrêt partiel au total du refroidissement.

Généralement, la chute des barres de sécurité est le plus souvent provoquée par un signal émis dès le dépassement de température normale de fonctionnement. Il y a bien entendu toujours un temps mort entre le moment où le dépassement de niveau fixé a lieu et le moment où les barres commencent à se déplacer.

Ce qui est important pour la protection de l'installation, c'est l'énergie ou l'évolution de la puissance de la pile en fonction du temps à partir duquel la puissance de déclenchement a été dépassée. Il apparaît alors qu'un arrêt de refroidissement concernant, soit l'ensemble du coeur de la pile, soit une seule de ses cellules, sera d'autant plus grave que l'on a affaire à une pile de haute puissance spécifique.

Par ailleurs, l'inertie thermique des barreaux combustibles et du fluide de refroidissement qui pourrait subsister autour du barreau accidenté freine la montée en température.

6.1. Accident lié au manque de réfrigération à puissance nominale.

C'est l'accident le plus fréquent susceptible de se produire sur

une pile de puissance. Ce manque de réfrigération étant lié le plus souvent à une panne du système d'évacuation des calories produites à puissance nominale.

Nous allons indiquer ici des résultats de calculs faits sur machines analogiques pour des piles de puissances spécifiques différentes.

On a représenté sur la figure 6-1, pour une pile à uranium de 30 MW tonne modérée et refroidie à l'eau lourde, l'allure de la puissance en fonction du temps pour plusieurs vitesses des barres de sécurité. On suppose ici qu'au temps initial, la pile est stabilisée en puissance.*

L'énergie à évacuer est égale à l'intégrale d'une de ces courbes augmentée de celle produite pendant le temps mort qui s'écoule entre le moment où le signal détectant le défaut apparaît, et le moment où les barres chutent.

On constatera qu'il n'est pas utile de dépasser 6 000 p. c. m. d'antiréactivité, que la durée d'injection des barres doit être courte, mais ne gagne pas à être inférieure au 1/10 de seconde.

On remarquera également que l'on a plus intérêt à injecter 6 000 p. c. m. en 2/10 de seconde plutôt que 500 p. c. m. en 0 seconde : les barres légères ultra-rapides présentent donc très peu d'intérêt.

L'énergie intégrale des courbes de la figure 6-1 est considérablement affectée par le temps mort qui précède la chute des barres de sécurité.

* Référence [51]

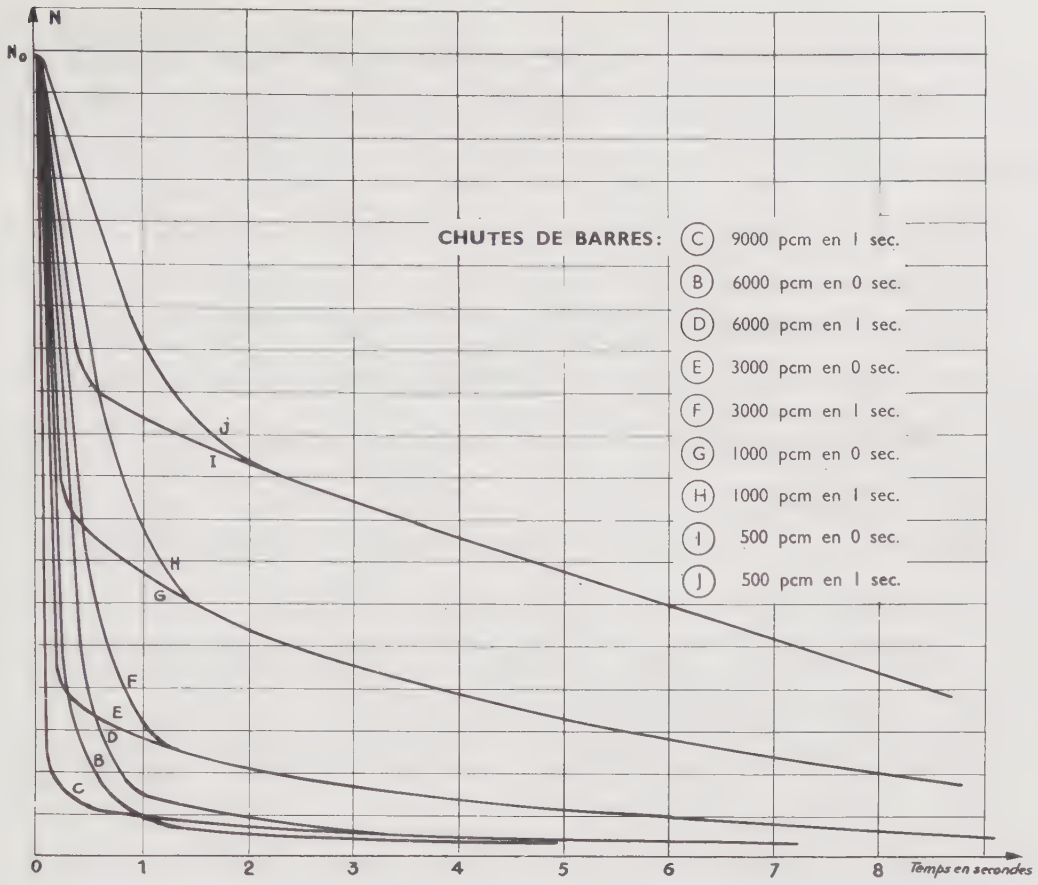

N
N₀
CHUTES DE BARRES:
C 9000 pcm en 1 sec.
B 6000 pcm en 0 sec.
D 6000 pcm en 1 sec.
E 3000 pcm en 0 sec.
F 3000 pcm en 1 sec.
G 1000 pcm en 0 sec.
H 1000 pcm en 1 sec.
I 500 pcm en 0 sec.
J 500 pcm en 1 sec.
0 1 2 3 4 5 6 7 8
Temps en secondes

fig.: 6-1

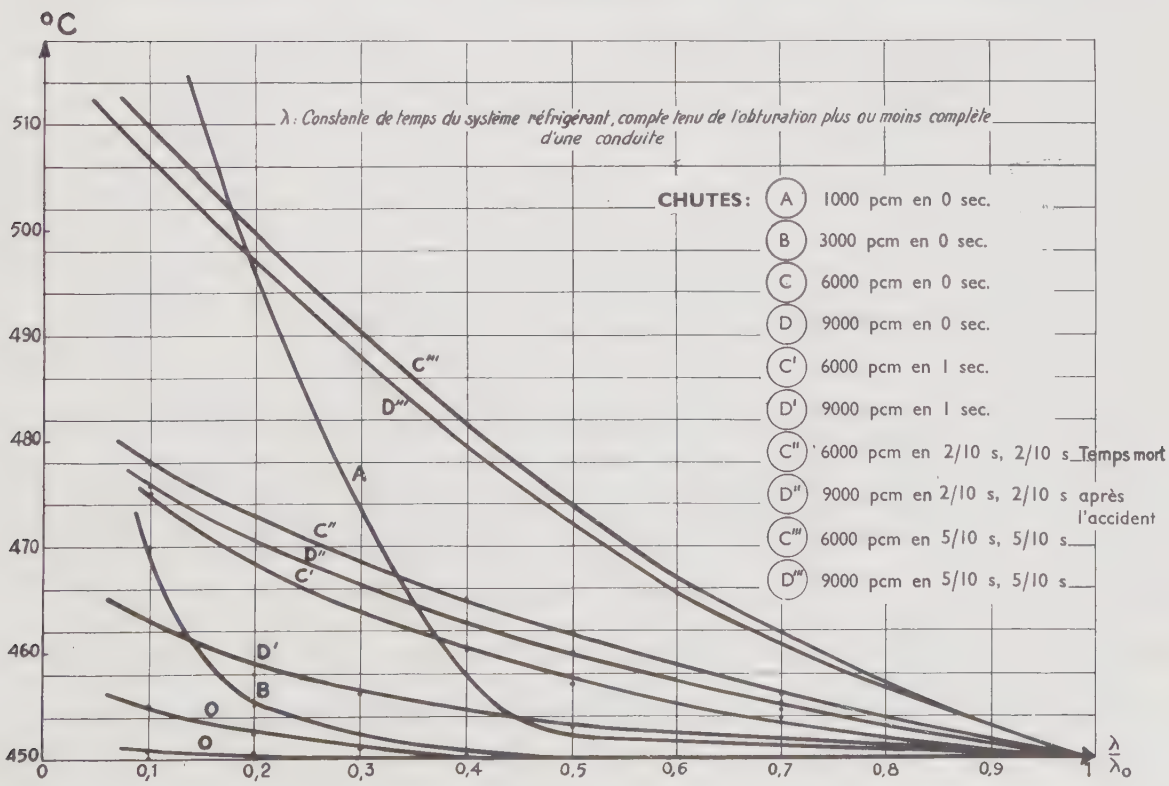

°C
510
500
490
480
470
460
450
λ : Constante de temps du système réfrigérant, compte tenu de l'obturation plus ou moins complète d'une conduite
CHUTES:
A 1000 pcm en 0 sec.
B 3000 pcm en 0 sec.
C 6000 pcm en 0 sec.
D 9000 pcm en 0 sec.
C' 6000 pcm en 1 sec.
D' 9000 pcm en 1 sec.
C'' 6000 pcm en 2/10 s, 2/10 s Temps mort
D'' 9000 pcm en 2/10 s, 2/10 s après l'accident
C''' 6000 pcm en 5/10 s, 5/10 s
D''' 9000 pcm en 5/10 s, 5/10 s
0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1
λ/λ₀

fig.: 6-2

Sur la figure 6-2 on a représenté les résultats de calcul relatifs aux températures maxima atteintes par l'uranium pour diverses conditions de chutes de barres imposées à la suite d'un manque de réfrigération.

On remarquera que pour obtenir une élévation de température compatible avec la tenue des cartouches d'uranium et inférieure à la température limite du changement de phase de l'uranium, il faut remplir les conditions suivantes :

- Assurer un refroidissement minimum pendant les premières secondes.
- Obtenir une vitesse de chute rapide pour une quantité d'antiréactivité suffisante.
- Réduire le temps mort d'ordre de chute au maximum.

On voit, par exemple, que si le refroidissement est garanti supérieur à 10 p. 100 de sa valeur nominale, il faut, pour éviter de dépasser 500 °C, assurer une vitesse de chute de 2/10 de seconde pour une antiréactivité de 6 000 p. c. m. avec un temps mort de l'ordre de 2/10 de seconde au maximum.

Pour les piles au graphite du type G2, G3, les inerties thermiques qui entrent en jeu sont beaucoup plus considérables.

Nous allons donner ici quelques résultats d'incidents de réfrigération étudiés sur calculateur analogique et relatifs à la pile G2.* Un des incidents probables à puissance nominale sur ce type de pile est le déclenchement des turbo soufflantes. Dans ce cas, la courbe de ralentissement de ces turbo soufflantes est affectée par l'état du vide au condenseur ; il peut se faire suivant les deux cas extrêmes A ou B indiqués figure 6-5.

* Référence [52]

Dans le cas où l'on suppose qu'après arrêt des turbo soufflantes la puissance neutronique reste constante, l'évolution des températures gaine combustible les plus chaudes sont indiquées figure 6-3, courbes 1 et 3. Dans le cas où l'on suppose que la puissance neutronique évolue avec le coefficient de température, on a les courbes 2 et 4. Les courbes de la figure 6-4 représentent, dans les mêmes conditions, l'évolution des températures gaine combustible les moins chaudes. Dans tous les cas, on peut constater que les vitesses d'évolution des températures sont beaucoup plus faibles que dans le cas des piles à eau. Si l'on envisage simultanément la chute des barres de sécurité et l'arrêt des turbo soufflantes, l'évolution des températures gaine combustible est indiquée sur la figure 6-6. On voit qu'au bout de 200 à 300 secondes, la température risque d'atteindre des valeurs dangereuses si aucune réfrigération n'est introduite dans le coeur pile.

6.2. Accident de réfrigération lié à la rupture du circuit primaire.

C'est un des accidents les plus graves qui puissent arriver à une pile atomique de puissance. En général, il constitue l'accident maximum prévisible qui est étudié dans le rapport de sûreté.* Pour chaque cas particulier, diverses solutions de secours sont proposées. L'hypothèse de cet accident justifie le plus souvent la construction d'une enceinte étanche autour de la pile, enceinte qui peut, dans certains cas, être relativement coûteuse surtout pour les piles de faible puissance spécifique. La probabilité d'un tel accident est très faible et l'histoire des centrales thermiques conventionnelles productrices d'énergie est très rassurante à cet égard.

* Référence [53]

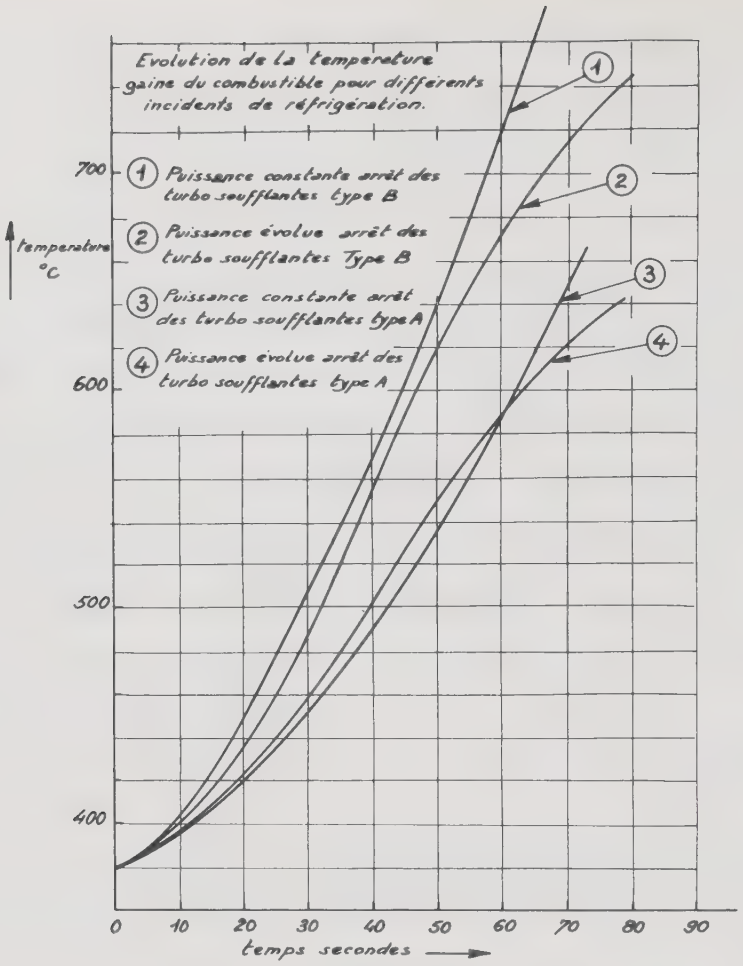

Evolution de la temperature gaine du combustible pour differents incidents de réfrigération.
1 Puissance constante arrêt des turbo soufflantes type B
2 Puissance évolue arrêt des turbo soufflantes Type B
3 Puissance constante arrêt des turbo soufflantes type A
4 Puissance évolue arrêt des turbo soufflantes type A
température °C
700
600
500
400
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
temps secondes

Fig : 6-3

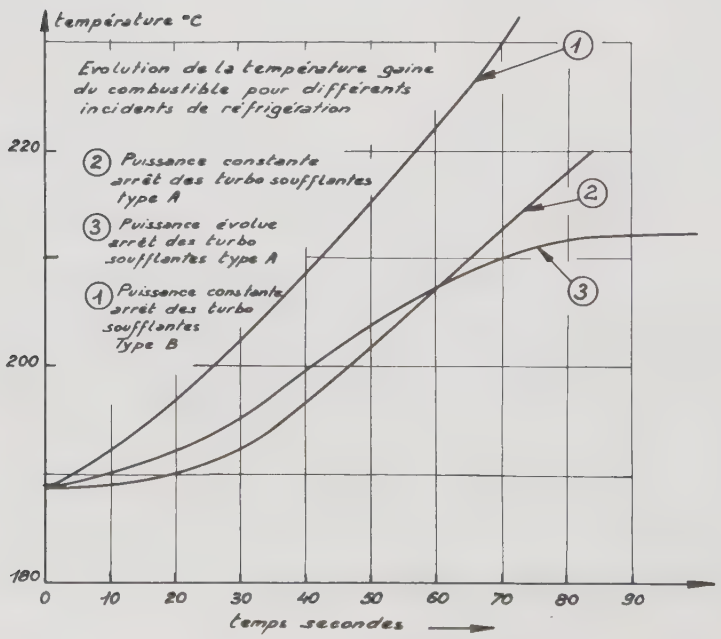

température °C
Evolution de la température gaine du combustible pour différents incidents de réfrigération
2 Puissance constante arrêt des turbo soufflantes type A
3 Puissance évolue arrêt des turbo soufflantes type A
1 Puissance constante arrêt des turbo soufflantes Type B
220
200
180
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
temps secondes

Fig : 6-4

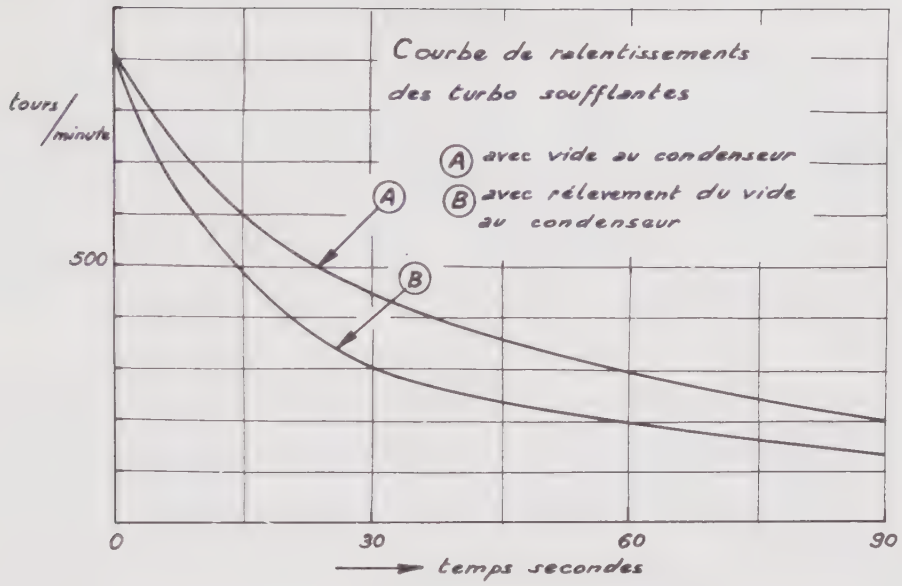


Fig : 6-5

Evolution de la température gaine du combustible dans le cas de l'arrêt des turbo soufflantes les barres de sécurité etant chutées après cet arrêt.

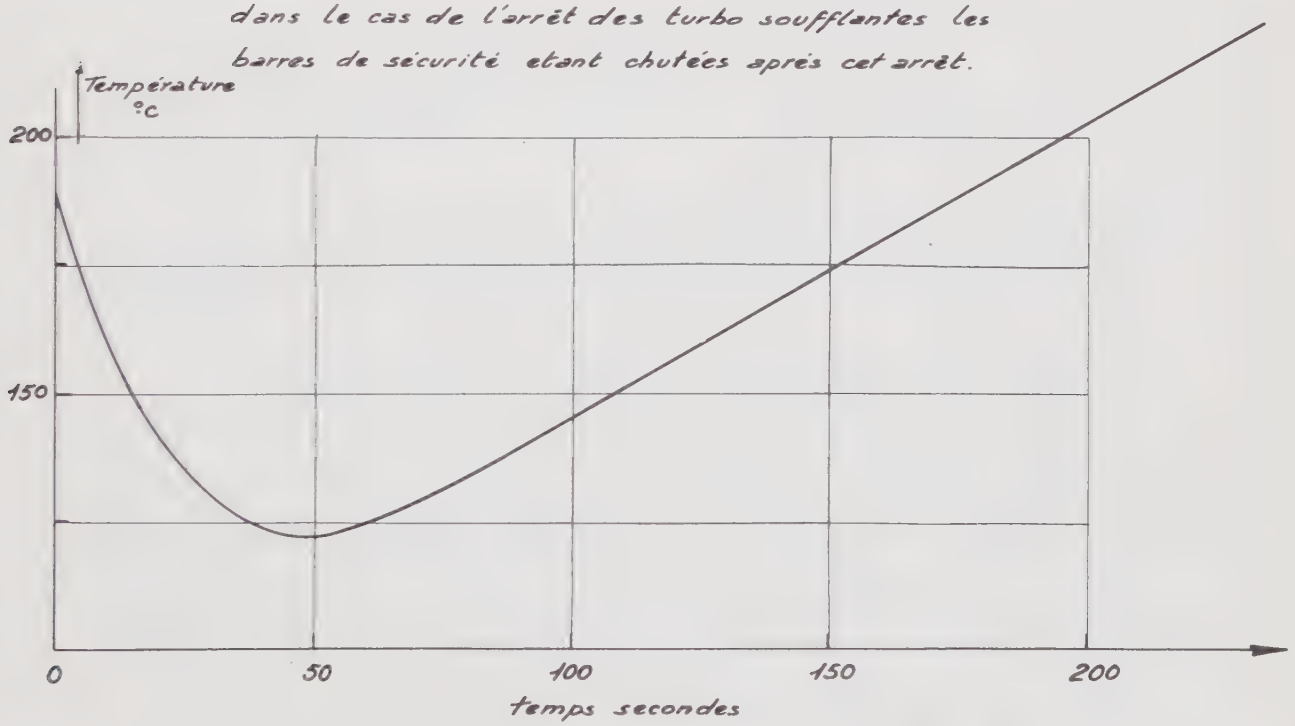


Fig : 6-6

Chapitre VII

PHILOSOPHIE DE LA SECURITE DE FONCTIONNEMENT DES PILES ATOMIQUES.

A partir des renseignements qu'on peut avoir sur les piles atomiques en fonctionnement, en construction ou en projet, il est possible de définir l'évolution actuelle de la philosophie de la sécurité des piles atomiques.*

7.1. Expériences exponentielles.

Pour ces expériences, on s'efforce d'avoir, quel que soit le chargement envisagé, un facteur de multiplication qui correspond à un keff de l'ordre de 0,8 à 0,9 au maximum. La garantie qu'on peut avoir sur la valeur de ce keff permet même très souvent de supprimer les barres de sécurité. On dispose toutefois sur ce genre d'expériences de quelques sécurités à niveau sur la mesure de flux neutriques qui agissent, par exemple, soit sur la vidange du modérateur, soit sur des dispositifs de séparation automatique du coeur en plusieurs zones.** L'accès au milieu multiplicateur fait l'objet de consignes très strictes et très souvent des verrouillages permettent d'éviter toute fausse manoeuvre du côté chargement. C'est bien entendu pendant cette opération que les risques d'accident sont les plus grands.

* Référence [54] ** Référence [55]

7.2. Piles expérimentales de faible puissance ou empilements critiques.

La philosophie qui prévalait au début de l'ère atomique et qui consistait à arrêter la pile pour toute panne intervenant dans son fonctionnement ou dans celui de ses auxiliaires ou de son appareillage est toujours d'usage. Il faut bien entendu que le nombre d'arrêts ainsi obtenus soit compatible avec le programme d'expérimentation prévu.

7.3. Piles expérimentales à haut flux et piles productrices d'énergie.

La philosophie de la sécurité de fonctionnement de ces piles est différente des précédentes et les tendances paraissent les suivantes :

a) Arrêter le moins souvent la pile.

- D'abord pour amortir le coût de sa construction et de son installation.

- Ensuite diminuer le nombre des opérations de démarrage, qui en général sont des opérations délicates surtout pour les piles à haut flux.

- Ensuite éviter les contraintes thermiques entraînées par les arrêts rapides. On sait en effet que les contraintes thermiques peuvent conduire à l'endommagement du coeur et entraîner par là même des accidents. C'est principalement le cas des piles à haute température et des piles de puissance spécifique élevée, comme les piles rapides par exemple.

b) Arrêter la pile chaque fois qu'il y a doute sur sa sécurité de fonctionnement, la vitesse de l'arrêt étant fonction de la gravité de

l'accident à éviter.

c) Eviter les interventions manuelles.

Pour satisfaire à ces critères, il faut rendre plus complexes les dispositifs ou les chaînes de sécurité à installer sur la pile et développer l'automatisme aussi bien du côté sécurité que du côté contrôle et pilotage.

En effet, pour ces piles, les fausses manoeuvres coûtent cher, même si leurs répercussions n'ont pas toutes le même caractère de gravité, certaines n'entraînent que des arrêts intempestifs alors que d'autres peuvent provoquer d'importants dégâts matériels et corporels.*

La philosophie de la sécurité influe beaucoup sur la conception et la réalisation des chaînes de sécurité.

* Référence [56]

Chapitre VIII

LES CHAINES DE SECURITE DES PILES ATOMIQUES.

8.1. Définition des chaînes de sécurité et les paramètres qui les caractérisent.

La définition du terme chaîne de sécurité est assez délicate et ambigue, elle prête même souvent à confusion. Nous dirons ici que les chaînes de sécurité d'une pile atomique constituent un ensemble qu'on peut représenter par le diagramme fonctionnel de la figure 8-1.*

Les détecteurs émettent le plus souvent des signaux électriques proportionnels aux grandeurs physiques neutroniques ou thermodynamiques : flux neutronique, température, pression, débits, etc... Pour les grandeurs neutroniques ce sont principalement : des chambres d'ionisation, des chambres à fission ou des compteurs. Pour les grandeurs physiques thermodynamiques ce sera par exemple les thermocouples, les débitmètres, les compteurs de pression de débit, etc...

Ces détecteurs délivrent le plus souvent des signaux électriques qu'il est nécessaire d'amplifier au moyen d'amplificateurs.

* Référence [57]

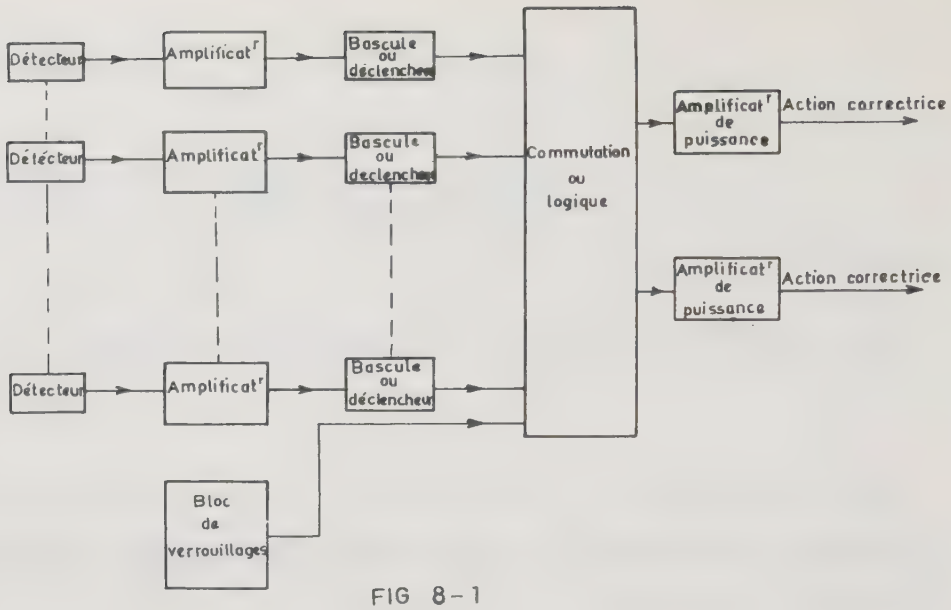
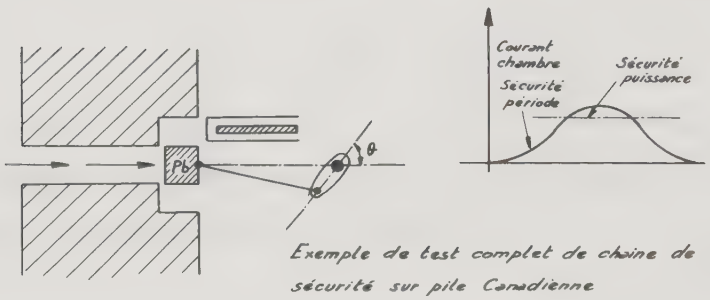
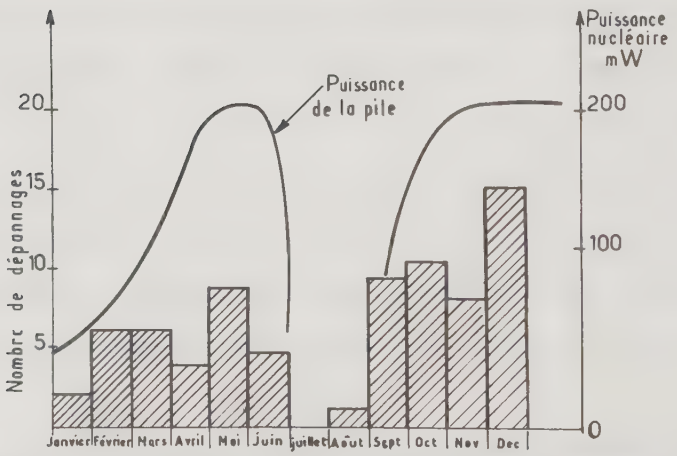


FIG 8-1



Exemple de test complet de chaine de sécurité sur pile Canadienne

Fig: 8-2



NOMBRE DE DEPANNAGES DES APPAREILS DE CONTROLE ET DE SECURITE DU REACTEUR NRU EN 1958

Répartition des pannes sur les amplificateurs linéaires et logarithmiques des chaînes de contrôle et de sécurité des piles canadiennes NRX et NRU 32 amplificateurs. Pannes réparties sur deux ans.

fig.: 8-3

Ces derniers sont suivis de bascules ou systèmes à seuil (déclencheurs par exemple) qui, pour une certaine valeur du signal d'entrée, se mettent dans un état d'équilibre déterminé. Les signaux de sortie de ces bascules sont combinés dans un ensemble dit de commutation ou encore ensemble logique. A la sortie de cet ensemble, certains signaux sont élaborés à partir des signaux d'entrée, amplifiés à leur tour, ils agissent sur des commandes ou des mécanismes afin d'élaborer certaines actions correctrices.

A l'entrée du bloc de commutation ou ensemble logique, intervient le bloc des verrouillages (lié principalement aux fausses manoeuvres à éviter). On constate que les actions correctrices sont mises en oeuvre, soit à partir de mesures physiques, soit à partir de verrouillages. D'où les termes de plus en plus courant de sécurité de niveau et de sécurités de verrouillages.

Ces actions correctrices interviennent le plus souvent sur le facteur de multiplication de la pile, soit par l'intermédiaire des barres de compensation et sécurité, soit par l'intermédiaire du modérateur. Elles pourront aussi agir directement sur le système d'évacuation des calories.

Pour un grand nombre de piles en fonctionnement de par le monde, ces actions correctrices se manifestent surtout par la chute des barres de sécurité à l'intérieur du coeur de la pile.

Très souvent la partie détecteurs et amplificateurs du diagramme précédent, fait partie des dispositifs de contrôle de la pile. Mais, de plus en plus, il y a séparation des détecteurs et amplificateurs

destinés au contrôle, des détecteurs et amplificateurs destinés à la sécurité. Nous donnerons un peu plus loin les arguments qui justifient pleinement cette tendance.

Que demande-t-on aux chaînes de sécurité ainsi définies : intervenir sur le fonctionnement de la pile chaque fois, et chaque fois seulement qu'il y a doute sur sa sécurité. La vitesse de l'arrêt étant fonction de la gravité de l'accident à éviter.

En général, on peut affirmer qu'aucune chaîne de sécurité ne satisfait parfaitement à ce critère. Il y a d'ailleurs une gradation sur la sévérité de ce critère comme nous l'avons mentionné plus haut, suivant les caractéristiques de la pile : pile expérimentale à faible flux, pile de puissance ou pile expérimentale à haut flux. Le programme de fonctionnement de la pile a aussi son importance, là il faut encore distinguer : entre piles de puissance productrices d'énergie du type centrales de base, des piles destinées à la propulsion ou des piles destinées à des mesures physiques, à la préparation d'isotopes, ou encore au test de certains matériaux.

Les paramètres qui permettent de comparer entre eux plusieurs chaînes de sécurité susceptibles d'être installées sur une pile sont la vitesse de réponse, le fonctionnement sûr, le taux de fausses manoeuvres ou d'arrêts inutiles de la pile qu'ils entraînent (taux de faux "scram" comme disent les Anglo-saxons).*

a) Vitesse de réponse ou constante de temps.

La vitesse de réponse, ou la constante de temps des dispositifs ou chaînes de sécurité est essentiellement fonction du temps qui

* Référence [58]

s'écoule depuis la détection du défaut jusqu'au moment où le fonctionnement de la pile est rétabli. Cette vitesse de réponse dépend de l'accident envisagé.

Très souvent, l'accident qui fixe cette vitesse de réponse est l'accident de démarrage, fonction à la fois des caractéristiques nucléaires de la pile et du taux d'insertion de réactivité. Bien entendu, il faut remarquer que le temps mort dû à la chaîne de sécurité n'est pas le seul à être pris en considération avant la mise en oeuvre d'une action correctrice et que le retard dû à la détection du défaut a aussi son importance ; parfois c'est même lui qui prime. C'est par exemple le cas de l'amplificateur linéaire à courant continu utilisant dans sa ligne de contre-réaction des résistances de haute valeur, ou de l'amplificateur logarithmique à courant continu utilisant la contre-réaction sur la grille écran du tube électromètre tétrode.

b) Le fonctionnement sûr.

Les dispositifs de sécurité doivent être de fonctionnement très sûr. C'est-à-dire qu'ils doivent toujours opérer lorsque cela est nécessaire et leurs pannes doivent autant que possible se faire dans le sens de la sécurité.

De plus le nombre de pannes de ces dispositifs laissant la pile sans protection doit être théoriquement nul. Comme ceci n'est pas encore pratiquement réalisable, il faut par contre que le temps pendant lequel la pile est sans protection soit très court.

c) Le taux d'arrêts inutiles ou de faux "scram".

Le nombre d'arrêts inutiles ou de faux "scram" entraînés par les pannes des chaînes de sécurité doit être le plus faible possible, bien entendu. A cet égard, tout le monde est d'accord pour dire qu'à l'heure actuelle, sur les piles de puissance en fonctionnement, le taux d'arrêts inutiles est de beaucoup trop élevé. Un effort important est fait pour le diminuer. Pour les piles expérimentales à haut flux, on impose aux chaînes de sécurité un taux d'arrêts inutiles inférieur à 1 par année, alors que pour les piles rapides, ce taux est reporté à 1 pendant la vie de la pile. Ces taux sont bien entendu très inférieurs à ce que l'on a sur nos piles, par exemple: la détection, l'annonce des défauts, le temps nécessaire à la réparation et à la maintenance des chaînes de sécurité, affectent beaucoup les paramètres dont nous venons de parler.

Pour déterminer ces paramètres ou tout au moins leur fixer des limites, il est nécessaire de faire des études d'accidents à partir de la définition de la pile et de son programme de fonctionnement et d'exploitation. Ces études sont faites soit sur piles maquettes - et l'on sait que dans cette voie par exemple le programme de l' "A. E. C." est énorme - soit sur calculatrices électroniques. En général d'ailleurs des études théoriques et expérimentales sont faites simultanément. Il faut bien entendu dans ces études d'accidents possibles se limiter à ceux dont la probabilité est la plus grande dans le temps pendant lequel la pile doit fonctionner. En général, on admet que quel que soit l'accident intervenant sur une pile à terre, on peut toujours introduire dans le coeur un poison qui absorbe les neutrons.

8.2. Les pannes d'appareillage, la multiplicité des éléments constituant les chaînes de sécurité : coïncidences, anticoïncidences et tests de bon fonctionnement.

La technologie actuelle des éléments qui composent les chaînes de sécurité ne permet pas de satisfaire à la fois au fonctionnement sûr et à un taux d'arrêts inutiles ou de faux scram très faible.

Il est indispensable de disposer sur ces chaînes de systèmes annonciateurs de défauts, qui en principe doivent tester en permanence les différents éléments des chaînes. Ceci n'est pas toujours réalisable on s'en doute et il est indispensable alors de faire des tests périodiques. Ces tests doivent en général se faire pendant la marche de la pile, d'où la nécessité de disposer de plusieurs chaînes de sécurité en parallèle. Remarquons qu'il est toujours difficile de faire le test complet de la chaîne, surtout du côté détecteurs. Disons pourtant que sur certains équipements ceci est prévu : on déplace périodiquement par exemple devant les détecteurs des écrans absorbeurs de neutrons.

Sur la figure 8-2, est indiqué un exemple de test complet de chaîne de sécurité sur pile canadienne. *

Pour une certaine position de l'angle θ les sécurités puissance et période doivent fonctionner.

Il faut aussi pouvoir réparer les défauts pile en marche et

* Référence [59]

diminuer le nombre de réparations à faire qui ne sont pas toujours faciles. Il faut donc pouvoir faire aisément de la maintenance et disposer bien entendu de matériel interchangeable.

Le nombre de pannes des éléments qui constituent les chaînes de sécurité et en particulier des appareils de mesure électronique est encore relativement élevé.

Sur la figure 8-3, on a indiqué, à titre d'exemple, la répartition des pannes intervenues sur les amplificateurs linéaires et logarithmiques des chaînes de contrôle et de sécurité des piles canadiennes NRU et NRX. On constate que ce taux de pannes est loin d'être négligeable. En ordonnée est indiqué, en fonction du temps, le nombre de dépannages effectués sur les appareils de contrôle et de sécurité de la pile NRU, en 1958.* La courbe de puissance de fonctionnement de la pile a aussi été tracée. On constate que le nombre de pannes est plus élevé pendant la montée en puissance ; ceci est normal. Pendant l'arrêt de la pile, on constate que des pannes se sont néanmoins produites ; elles sont dues à la mise en service du matériel de contrôle et de sécurité pour certaines manoeuvres effectuées sur la pile.

Les pannes d'un matériel ne sont pas réparties uniformément dans le temps. Sur la figure 8-4, pour un matériel donné, est indiqué en ordonnée le nombre de pannes en fonction de la durée de fonctionnement, les pannes au début de la mise en service sont plus nombreuses ; elles sont souvent inévitables : transport, montage, mise en route, erreurs de câblage, manque d'études initiales. Puis, les pannes normales apparaissent ; au point de vue répartition statistique, elles sui-

* Référence [60]

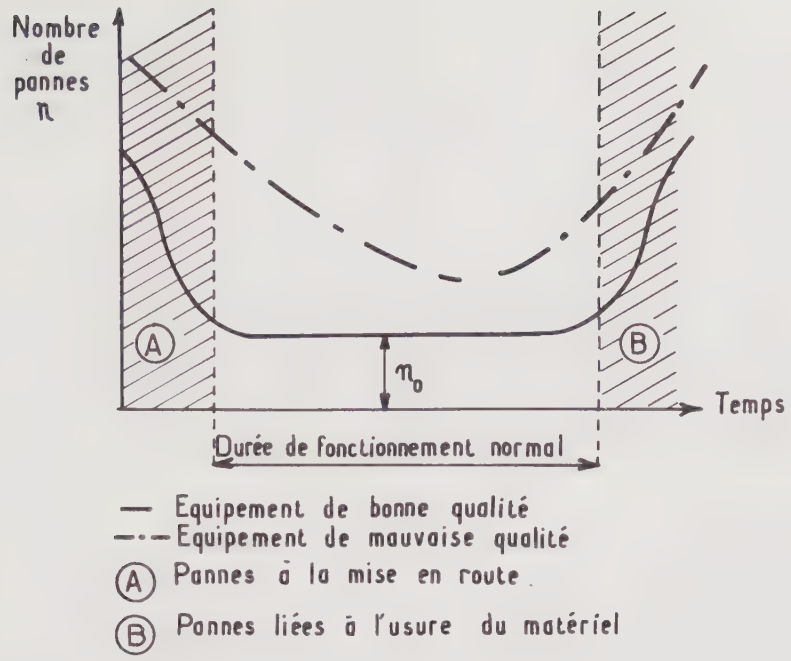
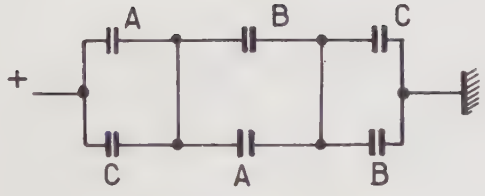
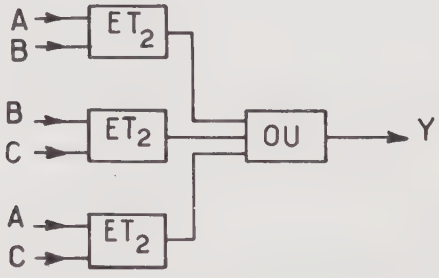


fig.: 8-4

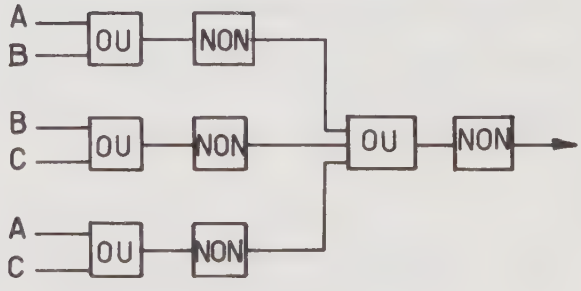


$\overline{Y} = \bar{A}\bar{B} + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{C}$

$Y = A.B + B.C + A.C$



$Y = AB + BC + AC$



$\overline{Y} = \bar{A}.\bar{B} + \bar{B}.\bar{C} + \bar{A}.\bar{C}$

SYSTEME A COINCIDENCES 2/3

fig.: 8-5

vent d'ailleurs une loi gaussienne. L'ordonnée n_o est fonction de la qualité du matériel. Ensuite le nombre de pannes augmente ; il est dû, bien entendu, à l'usure du matériel.

Nous résumerons plus loin l'évolution de la technologie qui permet de diminuer le nombre de pannes des appareils électroniques des chaînes de sécurité.

Disons, dès maintenant, que si ce nombre est en diminution, il est loin d'être nul et, qu'au stade actuel de la technologie, il est plus facile d'utiliser des systèmes à coïncidences plutôt que d'augmenter indéfiniment la sûreté de fonctionnement de tous les éléments des chaînes de sécurité. On s'efforce aussi de rendre les pannes aussi sûres que possible dans le sens de la sécurité, c'est-à-dire de la protection de la pile, mais il faut dès maintenant reconnaître que ce sont des limites difficilement accessibles. Il est bon de pouvoir comparer entre eux les différents circuits de coïncidences pour essayer de déterminer celui qui convient le mieux au programme de fonctionnement et d'exploitation de la pile. Nous reprendrons à cet effet les calculs développés par JACOBS Im et SIDDALL.* Pour comparer ces cicuits, nous supposerons qu'ils aboutissent à la chaîne de sécurité et nous utiliserons les deux paramètres suivants dont nous avons déjà parlé :

a) Le taux d'arrêts rapides inutiles ou faux "scram" (homogène à T^{-1}). C'est le nombre d'arrêts inutiles entraînés par le circuit.

b) Le facteur de mérite $\frac{\tau}{T}$, τ étant le temps qui sépare

* Référence [61]

deux tests successifs et T le temps pendant lequel la pile n'est pas protégée.

On développe ici la méthode de calcul de R et F sur un exemple simple : le circuit de chaîne de sécurité du type 2/3. Sur la figure 8-5 le circuit 2/3 est indiqué ; il est réalisé soit à l'aide de relais, soit à l'aide d'éléments logiques. Nous adoptons ici pour notre exemple des contacts de relais travaillant à l'ouverture. En notation d'algèbre logique, on a alors :

$$\bar{Y} = \bar{A} . \bar{B} + \bar{B} . \bar{C} + \bar{A} . \bar{C}$$

Le contact A fermé est noté A, le contact A ouvert est noté $\bar{A}$. Nous faisons les hypothèses suivantes :

- N_s désigne la fréquence des pannes sûres d'une chaîne, c'est-à-dire des pannes qui entraînent l'ouverture d'un des contacts. Nous supposons de plus que ces pannes sont uniformément réparties dans le temps.

- N_u désigne la fréquence des pannes non sûres d'une chaîne, c'est-à-dire des pannes qui laissent la pile sans protection et qui ferment par conséquent un contact. Nous admettons qu'il n'y a pas corrélation entre les différents appareils de mesure, ce qui n'est pas toujours vrai bien entendu, par exemple il est possible que l'alimentation HT des détecteurs soit commune.

- N_o désigne la fréquence de la maintenance que nous sommes libres de fixer.

- τ_o est la durée de cette maintenance et τ le temps qui

sépare deux tests successifs.

- t_t est la durée du test périodique et t_R la durée de la panne qui laisse le relais collé.

Supposons que A reçoive un ordre d'ouverture à l'instant t. Cet ordre peut parvenir d'une panne du type N_s (pannes sûres). La fréquence de ces pannes est N_s. Soit t_R le temps pendant lequel A reste ouvert. La probabilité pour que A soit ouvert à l'instant t est $N_s t$; la probabilité pour que B et C s'ouvrent dans l'intervalle de temps t_R est $2 N_s t_R$ et la probabilité de coïncidence de ces deux évènements est $2 N_s t \times N_s t_R$. Le taux d'arrêts inutiles correspondant à la combinaison AB, AC est :

$$R_s = \frac{2 N_s t \times N_s t_R}{t} = 2 N_s^2 t_R$$

Comme B et C jouent le même rôle que A, on a :

$$R_s = 3 \times 2 N_s^2 t_R = 6 N_s^2 t_R$$

Si l'on tient compte des tests dont la fréquence est N_t et la durée t_t et la maintenance de fréquence N_o et de durée t_o, :

$$R_s = 6 N_s (N_s t_R + N_t t_t + N_o t_o)$$

Calcul de T.

Supposons qu'à l'instant t une panne se produise de façon que le contact A reste fermé, la probabilité d'une telle éventualité est $N_u t$. La probabilité pour qu'une autre panne se produise de façon qu'à l'instant t le contact B soit fermé pendant l'intervalle de temps dt est $N_u dt$.

La probabilité simultanée de fermeture de A et B à l'instant t est $N_u t \times N_u dt = N_u^2 t\, dt$.

Soit $\tau - t$ le temps pendant lequel la pile court le risque de ne pas être protégée avant le test suivant. Si l'on affecte à chaque évènement "pile non protégée" la probabilité $N_u^2 t\, dt$ et la variable aléatoire "$\tau - t$", on a pour valeur moyenne :

$$T'_A = \int_o^\tau N_u^2\, t\, (\tau - t)\, dt, \quad \text{homogène à un temps.}$$

Le même raisonnement appliqué à A . C donne :

$$T''_A = \int_o^\tau N_u^2\, t\, (\tau - t)\, dt \quad \text{et} \quad T_A = T'_A + T''_A = 2 \int_o^\tau N_u^2\, t\, (\tau - t)\, dt$$

Comme A, B, C jouent le même rôle,

$$T = 6 \int_o^\tau N_u^2\, t\, (\tau - t)\, dt = N_u^2\, \tau^3$$

et par suite :

$$\frac{\tau}{T} = \frac{1}{N_u^2\, \tau^2}$$

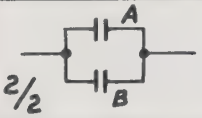
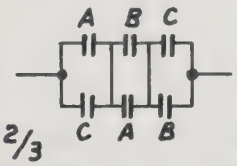
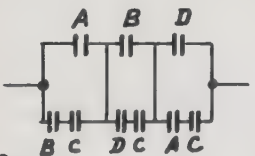
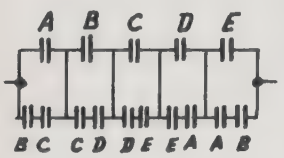
Dans le tableau de la figure 8-6 , nous indiquons le taux de faux "scram" et le facteur de mérite pour différents circuits de coïncidences. Avec les valeurs suivantes :

N_s = 10 / année

N_u = 1 / année

N_t = 2 200 / année

SYSTEMES A COINCIDENCES

CIRCUIT TYPE	FONCTION LOGIQUE POUR CONTACT A OUVERTURE	TAUX DE FAUX SCRAM	VALEUR NUMERIQUE	Facteur de mérite $\frac{\tau}{T}$	Valeur numérique $\frac{\tau}{T}$
 2/2	$\bar{A}.\bar{B}$	$2N_s\left(N_s t_R + N_t t_t + N_o t_o\right)$	0,02	$\frac{1}{N_U \tau}$	860
 2/3	$\bar{A}\bar{B}+\bar{B}\bar{C}+\bar{A}\bar{C}$	$6N_s\left(N_s t_R + N_t t_t + N_o t_o\right)$	0,06	$\frac{1}{N_U^2 \tau^2}$	$(860)^2$
 2/4	$\bar{A}(\bar{B}+\bar{C})+$ $\bar{B}(\bar{D}+\bar{C})+$ $\bar{D}(\bar{A}+\bar{C})$	$12N_s\left(N_s t_R + N_t t_t + N_o t_o\right)$	0,12	$\frac{1}{N_U^3 \tau^3}$	$(860)^3$
 2/5	$\bar{A}(\bar{B}+\bar{C})+$ $\bar{B}(\bar{C}+\bar{D})+$ $\bar{C}(\bar{D}+\bar{E})+$ $\bar{D}(\bar{E}+\bar{A})+$ $\bar{E}(\bar{A}+\bar{B})$	$20N_s\left(N_s t_R + N_t t_t + N_o t_o\right)$	0,2	$\frac{1}{N_U^4 \tau^4}$	$(860)^4$
2/P		$2C_p^2 N_s\left(N_s t_R + N_t t_t + N_o t_o\right)$	$2C_p^2 0{,}02$	$\frac{1}{(N_U \tau)^{p-1}}$	$(860)^{p-1}$

N_s - fréquence des pannes sures d'une chaine 10/Année
N_U - fréquence des pannes non sures d'une chaine 1/Année
N_t - fréquence des tests (1 par 4 heures = 2.200 fois par an)
N_o - fréquence de la maintenance (50 fois par an)
t_o - durée de la maintenance (6 minutes)
τ - temps qui sépare 2 tests successifs (10 heures)
t_t - durée du test. 10 secondes
t_R - durée de la panne sure . 6 minutes

fig.: 8-6

N_o = 50/année

t_o = 5 minutes

τ = 10 heures

t_t = 10 secondes

t_R = 6 minutes.

On voit que le taux de faux "scram" et le facteur de mérite croissent avec le nombre de chaînes. Mais il apparaît qu'en faisant un compromis entre ces deux paramètres, le système 2/3 est le meilleur : une chute de barres intempestive pour 10 années de fonctionnement et un temps égal à 2/10 s pendant lequel la pile n'est pas protégée.

On peut aussi comparer les circuits de coîncidences en supposant la mise en service de tests permanents sur les chaînes de mesure ; autrement dit, supposons alors que les pannes sûres ou non sûres soient mises en évidence dès leur apparition. Il faut bien entendu faire intervenir le temps nécessaire pour réparer la panne. On admet alors que pendant la réparation le contact A reste ouvert ou fermé suivant que la panne est sûre ou non sûre.

A l'aide d'un raisonnement semblable à celui que l'on vient de faire on aboutit aux formules indiquées sur la figure 8-7. Les valeurs numériques données sont calculées avec :

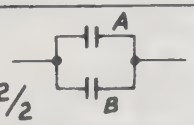
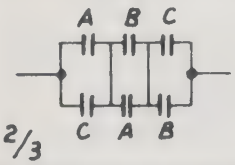
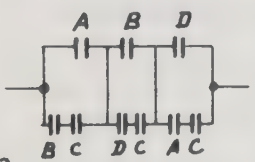
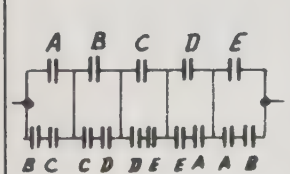
N_s = 10/année

N_u = 1/année

et t = 30 minutes.

Le taux de faux "scram" et le taux de pannes qui laissent la pile sans protection varient en sens inverse, lorsque le nombre de

SYSTEMES A COINCIDENCES
(Avec tests permanents)

CIRCUIT TYPE	FONCTION LOGIQUE POUR CONTACT A OUVERTURE	TAUX DE FAUX SCRAM	VALEUR NUMERIQUE	TAUX DE PANNES QUI LAISSENT LE REACTEUR SANS PROTECTION	VALEUR NUMERIQUE
 2/2	$\bar{A}.\bar{B}$	$2 N_s^2 t$	0,012	$2N_u$	2
 2/3	$\bar{A}\bar{B}+\bar{B}\bar{C}+\bar{A}\bar{C}$	$6 N_s^2 t$	0,036	$6 N_u N_u t$	0,00036
 2/4	$\bar{A}(\bar{B}+\bar{C})+$ $\bar{B}(\bar{D}+\bar{C})+$ $\bar{D}(\bar{A}+\bar{C})$	$12 N_s^2 t$	0,072	$24 N_u (N_u t)^2$	8.10^{-8}
 2/5	$\bar{A}(\bar{B}+\bar{C})+$ $\bar{B}(\bar{C}+\bar{D})+$ $\bar{C}(\bar{D}+\bar{E})+$ $\bar{D}(\bar{E}+\bar{A})+$ $\bar{E}(\bar{A}+\bar{B})$	$20 N_s^2 t$	0,112	$120 N_u (N_u t)^3$	$2,35\ 10^{-11}$
2/P		$P(P-1) N_s^2 t$	$p(p-1)$ 0,06	$P! N_u (N_u t)^{P-2}$	$P! N_u (N_u t)^{P-2}$

N_s - fréquence des pannes sures d'une chaine 10/Année

N_u - fréquence des pannes non sures d'une chaine 1/Année

t - temps nécessaire pour réparer la chaine en panne. 30 minutes

fig.: 8-7

chaînes augmente. On constate qu'en faisant encore un compromis entre les deux le circuit 2/3 est le plus favorable.

D'après les calculs des paramètres : taux de faux "scram" et facteur de mérite, on voit que le circuit 2/3 est de loin le meilleur. C'est lui qui est d'ailleurs adopté sur un grand nombre de piles. Il faut dire que c'est un système coûteux puisqu'il nécessite trois chaînes de mesure en parallèle. Mais il est bon de remarquer que le coût du contrôle et des dispositifs de sécurité d'une pile de puissance ne représente souvent qu'une dépense de l'ordre de 1 p. 100 du coût de l'installation.

Bien entendu le système 2/3 est intéressant à condition que le taux de pannes de chaque chaîne soit suffisamment faible. Pour la pile Rapsodie où l'on s'est fixé un faux "scram" pendant la vie de la pile, c'est-à-dire approximativement 20 ans, on constate que si l'on adopte le système 2/3 comme circuit de coïncidences, il faut diminuer N_s.

Pour diminuer N_s et N_u il est nécessaire d'améliorer le fonctionnement des éléments qui constituent les chaînes de sécurité.

8.3. Caractéristiques auxquelles doivent satisfaire les appareils de mesures physiques des chaînes de sécurité, performances en régime dynamique de fonctionnement.

8.3.1. Appareils de mesures nucléaires.

Ces appareils se divisent en deux classes, les appareils du

type électronique impulsionnelle pour les mesures de comptage : compteurs à BF^3 ou chambres à fissions et les appareils du type électronique à amplificateur à courant continu pour les mesures de courant fourni par les chambres d'ionisation.

Ici, nous allons surtout envisager pour caractéristiques des appareils, la vitesse de réponse.

a) Si le flux neutronique est contrôlé à bas niveau par des chambres à fissions ou par des compteurs à BF^3 fonctionnant en impulsions, on sait que la gamme d'utilisation de ces détecteurs est relativement réduite. En effet, au-dessous d'une dizaine de coups par seconde, les fluctuations statistiques sont telles que les mesures instantanées ont peu de signification ; au-dessus de quelques 10^5 coups / s, détecteurs et électroniques sont voisins de la saturation pour laquelle le fonctionnement est très incertain. Pour actionner des alarmes à partir de telles chaînes, on utilise généralement des intégrateurs linéaires ou logarithmes dont la tension de sortie actionne un circuit à seuil. On peut associer des périodemètres aux intégrateurs logarithmiques et obtenir ainsi des signaux d'alarme lorsque la période devient trop courte. Ces appareils sont efficaces quand les dépassements de seuils sont produits par des divergences dont la période est supérieure à une seconde ou une fraction de seconde. En cas de divergence accidentelle de période plus courte, la gamme d'utilisation des détecteurs, mentionnés plus haut peut se trouver rapidement franchie, et alors les circuits intégrateurs actionnant les sécurités ne peuvent remplir leur rôle, d'une part à cause de leurs constantes de temps importantes, d'autre part à cause de la saturation qui risque de paralyser détecteurs et circuits de mise en forme.* C'est pour pallier ces inconvénients qu'a été développé un dispositif de sécurité "maxi". C'est un montage qui, à

* Référence [62]

partir des chaînes à impulsions, permet d'actionner des alarmes lorsque la puissance de la pile dépasse un niveau déterminé.

Le principe de ce dispositif consiste en une suite de comptage en 10^{-2} s, séparés par des remises à zéro. Dès que le nombre des impulsions accumulées pendant un comptage dépasse le seuil choisi, un relais est déclenché. Les fluctuations statistiques provoquent bien entendu de fausses alarmes dont la probabilité dépend du seuil choisi et de la puissance de la pile. Pour diminuer cette probabilité de fausses alarmes, on peut alors augmenter la durée des comptages jusqu'à 10^{-1} seconde.

b) Si le flux neutronique est contrôlé par des chambres à ionisations (du type à dépôt de Bore ou à fissions) fonctionnant en courant, on sait que la gamme d'utilisation de ces chambres est relativement importante : elle peut être de l'ordre de 7 à 8 décades.

Les types principaux d'appareils amplificateurs de courant sont du type linéaire à couplage direct ou à modulation ou du type logarithmique ; on sait que ces amplificateurs peuvent avoir leurs performances nettement améliorées par l'emploi de la contre réaction. Envisageons le calcul de la constante de temps d'un amplificateur du premier type liée aux circuits d'entrée.

Si l'on considère un tel amplificateur dont le gain A en boucle ouverte est grand et supposons qu'on applique une contre réaction $k_2 V_s$ sur la base de la résistance de haute valeur R placée à l'entrée (voir figure 8-8), I étant le courant fourni par la chambre d'ionisation dont la capacité interélectrodes est C_1, C_2 la capacité parasite aux bornes de R et i_x le courant grille du 1er tube (en général un tube électromètre). *

* Référence [63]

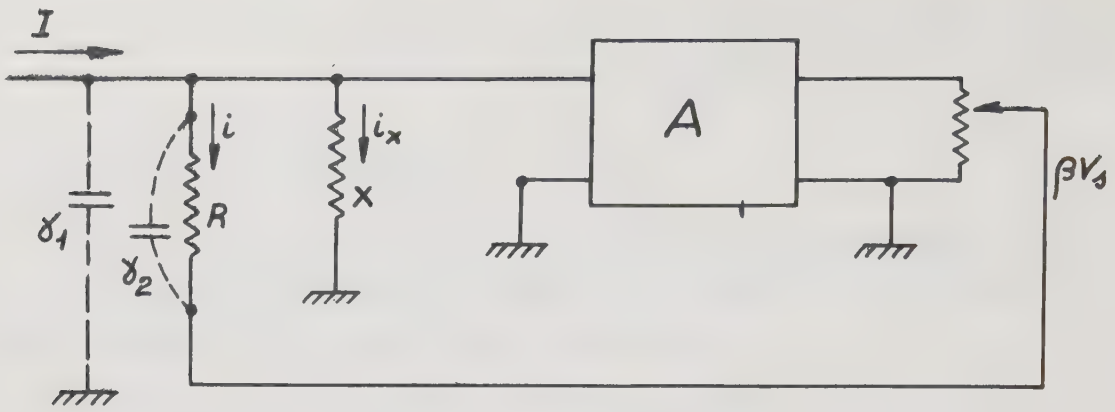


Fig : 8-8

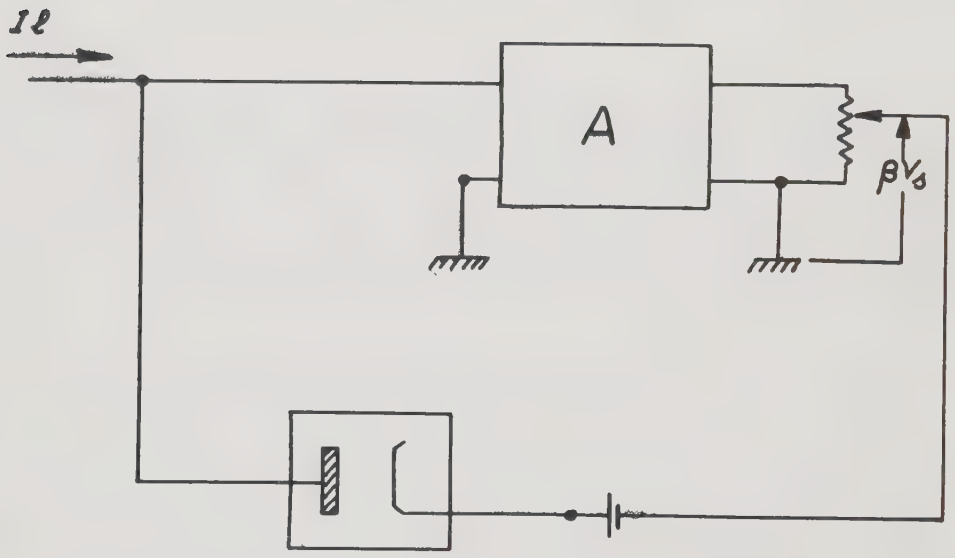


Fig : 8-9

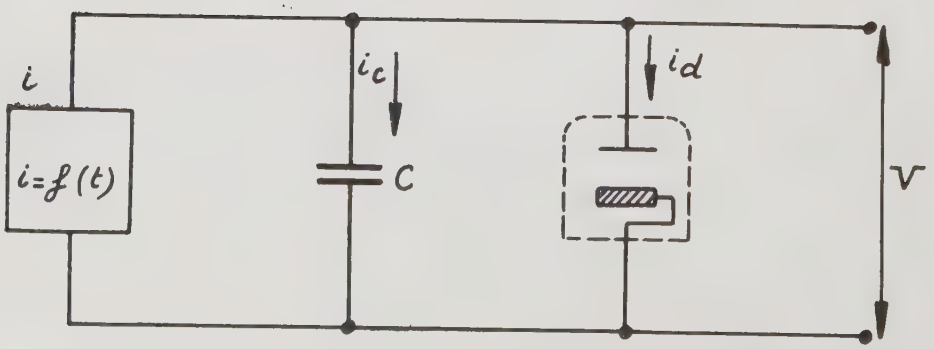


Fig : 8-10

Si l'on néglige le courant grillé on peut écrire, quel que soit k_2 :

$$V_s = A (k_2 V_s + RI) \quad \text{ou encore} \quad V_s = \frac{A}{1 - A k_2} RI$$

Pour $k_2 = 1$, ce qui correspond à la contre réaction totale :

$$V_s = \frac{A}{1 - A} RI \quad \text{soit pour A grand} \quad V_s \simeq RI$$

la résistance d'entrée est donc remplacée par $\frac{R}{1 - A k_2}$ et la capacité C_2 par $C_2 (1 - A k_2)$. La constante de temps du circuit d'entrée devient alors :

$$\frac{R}{1 - A k_2} \left\{ C_1 + C_2 (1 - A k_2) \right\} = R \left\{ \frac{C_1}{1 - A k_2} + C_2 \right\}$$

et pour $k_2 = 1$, on a :

$$R \left(\frac{C_1}{A} + C_2 \right)$$

le terme irréductible est RC_2, le terme principal étant approximativement divisé par le gain ; C_2 est en général de l'ordre de 2 à 3 pF.

On voit donc que, pour des valeurs de résistances comprises entre 10^{10} et 10^{12} Ω, la constante de temps est comprise entre 0,02 0,03 et 2 à 3 secondes. Du point de vue vitesse de réponse des résistances supérieures à 10^{10} ohms sont donc à proscrire dans de tels amplificateurs utilisés dans les chaînes de sécurité.

Lorsque l'on veut suivre l'évolution de la puissance neutronique sur un grand nombre de décades, comme cela peut être souvent le cas dans les opérations de démarrage, il est intéressant d'utiliser

un amplificateur logarithmique. On sait que la caractéristique d'un tel amplificateur est en général obtenue par un élément thermoionique tel qu'une diode dont la plaque est portée à un potentiel négatif.

Si on connecte une diode à anode négative à la place de la résistance de haute valeur d'un amplificateur à couplage direct (voir figure 8-9), on a :

$$V_s = \frac{A}{1 - A k_2} (E_T \log_e I + \Delta\varphi - E_T \log_e Is)$$

I_s étant le courant de saturation de la diode, $\Delta\varphi$ la différence de potentiel de contact entre les deux électrodes et E_T le potentiel thermique. On voit donc que V_s est à une constante près proportionnelle à $\log_e I$. On peut alors essayer de déterminer la réponse d'un tel amplificateur à une variation de la puissance neutronique compte tenu de la capacité d'entrée, la résistance de la diode varie bien entendu inversement avec le courant, aussi la constante de temps décroît lorsque ce courant augmente. Le schéma simplifié de l'amplificateur est alors indiqué sur la figure 8-10.

i est le courant fourni par la chambre d'ionisation proportionnel à la puissance neutronique.

C est la capacité parasite aux bornes de la diode.

V est alors défini à partir des équations suivantes* :

$$\begin{cases} i = c \dfrac{dv}{dt} + i_d \\ i_d = I\, e^{V} \\ i = k_n\, n \end{cases}$$

I, V et k_n étant des constantes ; n la puissance neutronique.

* Référence [64]

On a résolu ces trois équations à l'aide d'une machine analogique dans le cas où l'évolution de la puissance neutronique se fait à partir de l'état sous critique par libération linéaire de réactivité.* Cette évolution de puissance neutronique pour différentes valeurs de libération de réactivité - pour une pile à uranium légèrement enrichi où $\theta = 5\ 10^{-4}$ s et une antiréactivité initiale de 3 000 pcm - est indiquée sur la figure 8-11. Elle a été obtenue par résolution des équations cinétiques à 6 groupes de neutrons retardés sans tenir compte du coefficient de température.

Dans le cas où l'on choisit une diode du type EA 50 on a :

$$i_d = 10^{-13} \quad e^{1,15\ V}$$

et une chambre d'ionisation du type CCPN 10, on a :

$$i_{amp} = 2\ 10^{-8}\ n$$ n étant exprimée en watt.

On a indiqué sur la figure 8-12 les résultats de la résolution des équations pour différentes valeurs de la capacité parasite. En abscisse on a porté le temps et en ordonnée le rapport : puissance réelle / puissance indiquée.

Sur la figure 8-13 on a tracé la variation du maximum du rapport : Puissance réelle / puissance indiquée, pour différentes valeurs de capacité parasite et différentes valeurs de vitesse de libération de réactivité.

On constate dans tous les cas que lorsque la capacité parasite aux bornes de la diode est inférieure à quelques picofarads, la constante de temps de l'amplificateur logarithmique est faible. On

* Référence [65]

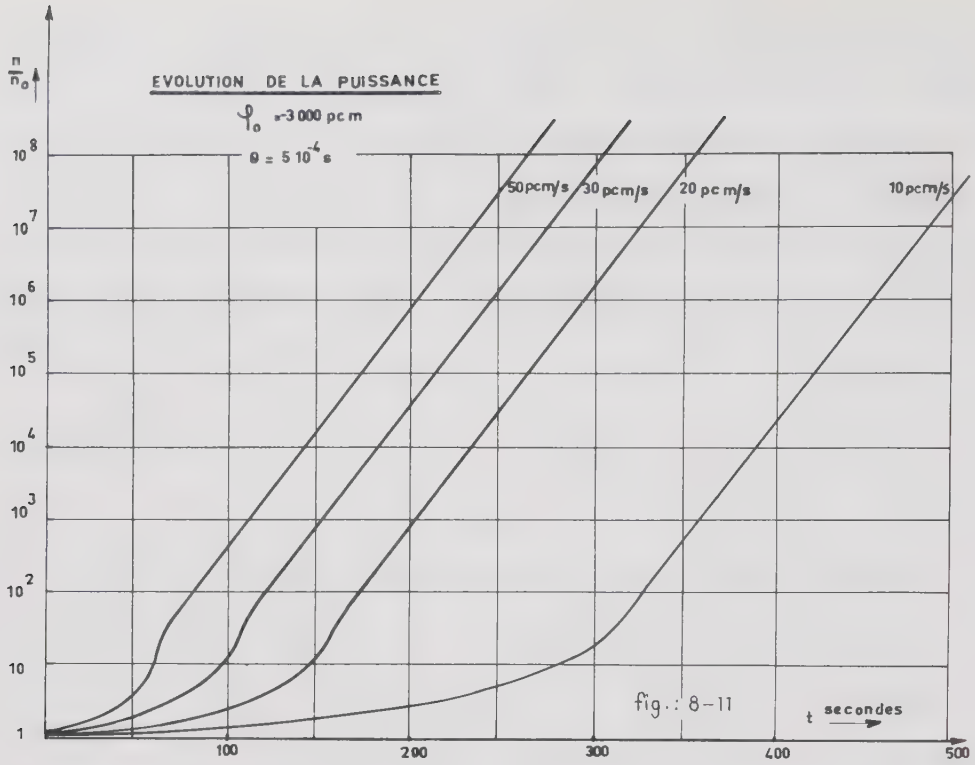


fig. : 8-11

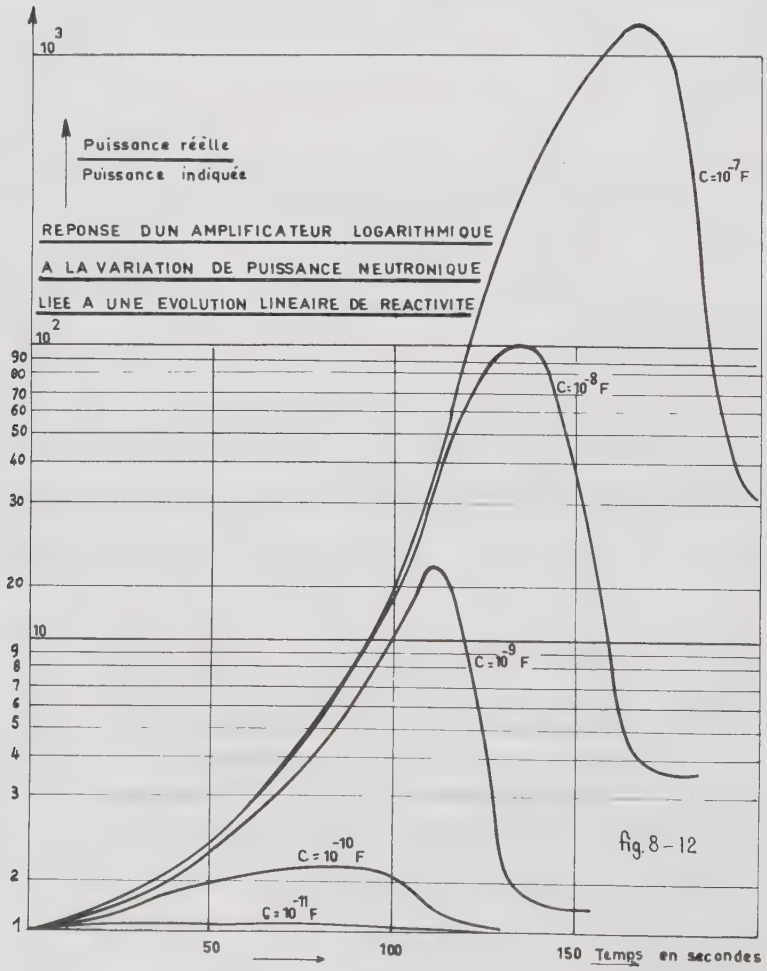
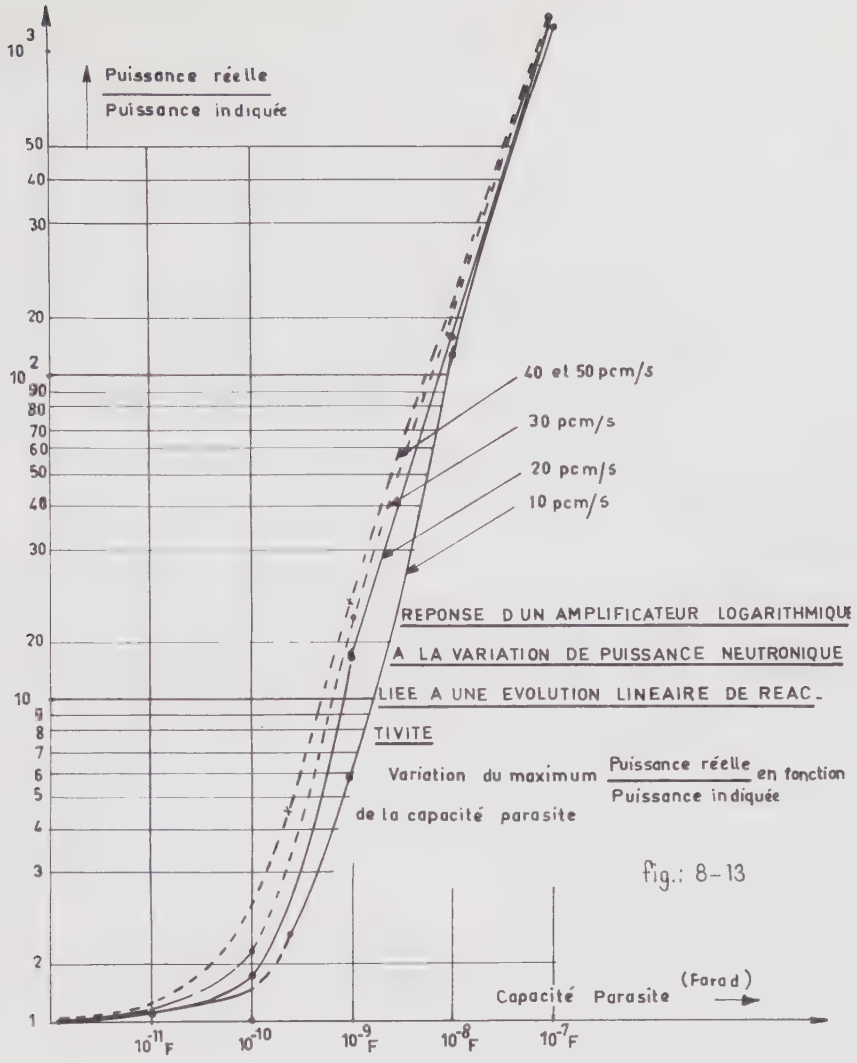


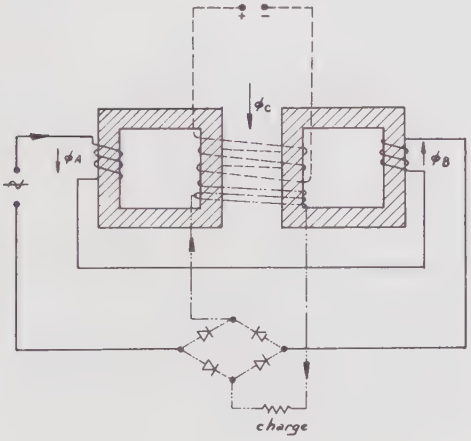
fig. 8-12

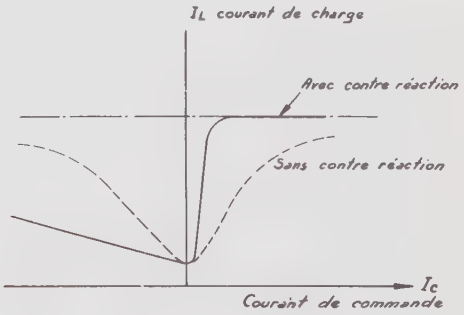


REPONSE D UN AMPLIFICATEUR LOGARITHMIQUE A LA VARIATION DE PUISSANCE NEUTRONIQUE LIEE A UNE EVOLUTION LINEAIRE DE REACTIVITE

Variation du maximum $\frac{\text{Puissance réelle}}{\text{Puissance indiquée}}$ en fonction de la capacité parasite

fig.: 8-13





Amplificateur magnétique à réactance saturable (avec contre réaction)

Fig : 8-14

aura donc toujours intérêt, au point de vue vitesse de réponse, à avoir cette capacité aussi faible que possible.

8.3.2. Appareils de mesures thermodynamiques.

Ces appareils sont essentiellement destinés à mesurer des températures, des pressions ou des débits. Ils comprennent essentiellement des capteurs chargés de convertir la grandeur physique à mesurer en signal électrique, suivis d'amplificateurs destinés à amplifier ce dernier. On leur demande de donner une relation constante entre le signal électrique fourni et la grandeur physique à mesurer et d'avoir un temps de réponse aussi faible que possible. Contrairement aux mesures neutroniques, la vitesse de réponse est ici limitée par les capteurs et non pas par l'électronique de mesure. Pour les piles de puissance, les mesures de température semblent devenir primordiales du point de vue sécurité. Lorsque ce nombre de mesures est très important, il y a alors lieu de disposer de systèmes explorateurs très rapides dont la réalisation technique pose des problèmes techniques difficiles à résoudre du côté sûreté de fonctionnement dans le temps.

8.4. Les automatismes d'interdiction et les méthodes nouvelles d'élaboration de leurs circuits.

On a déjà dit qu'il fallait éviter les interventions manuelles pour améliorer la sûreté de fonctionnement des piles atomiques et que pour cela il est indispensable de développer l'automatisme aussi bien du côté sécurité que du côté contrôle et pilotage.

Cet automatisme, bien entendu, n'est pas nouveau ; dès la

mise en service des piles de puissance en particulier, des systèmes de régulation automatique de l'ensemble des installations ont été déterminés et mis en place. Ce qu'il y a lieu de développer du côté sécurité est à notre avis l'automatisme d'interdiction qu'on pourrait peut être séparer de l'automatisme de régulation. Dans le cas, par exemple, d'une pile de puissance du type Calder Hall ou EDF 1, si l'on envisage le démarrage de la centrale, on constate que pour la seule mise en route d'une soufflante, il y a 30 à 40 manoeuvres permises pour 300 cas d'interdictions. Le nombre d'alarmes seul est de l'ordre de 1 500, par exemple pour une centrale du type EDF II. La centralisation des manoeuvres s'impose alors et il est impossible de la concevoir sans changer de méthodes. C'est ainsi que le principe de la "Check list" que l'on utilise encore beaucoup sur certains avions, a d'abord été remplacé par le commutateur, lui-même, bientôt remplacé aussi par des automatismes qui se trouvent dans des ensembles mis en route à partir des boutons de commande des machines.

Mais alors, avec la croissance du nombre de fausses manoeuvres, la conception des automatismes d'interdiction devient de plus en plus complexe et peut nécessiter pour leur réalisation l'utilisation par exemple de plusieurs centaines, voir milliers, de relais électromécaniques. On conçoit, du côté sureté de fonctionnement, l'intérêt d'utilisation de relais statiques du type magnétique ou semiconducteur. On sait en effet qu'en dehors de leur durée de vie (nombre de commutations possible), ils sont souvent beaucoup plus souples que les relais électromécaniques pour réaliser des combinaisons de signaux ou encore ce que l'on appelle aujourd'hui fonctions logiques.

Mais alors la conception des schémas devient de plus en plus complexe au fur et à mesure que les installations s'orientent vers l'au-

tomatisme complet et que les puissances augmentent.

Les méthodes empiriques souvent employées actuellement ne permettent pas toujours de dégager immédiatement la solution la plus simple, ni d'éliminer dès le départ les cas d'incertitude qui ne se révèlent parfois qu'en exploitation.

Il est de plus en plus sûr que ce problème trouvera sa solution avec l'application des principes de l'Algèbre de Boole et des méthodes de synthèses dérivées. En effet, ces méthodes permettent d'écrire, à partir des conditions de fonctionnement imposées aux différents organes d'équations minimales du système à réaliser, et de passer ensuite par leur traduction au schéma dit "logique" qui est le plus simple, le plus sûr et qui utilise le minimum d'appareils.

Rappelons que ce sont les ingénieurs japonais WAKASIMA et HANZAWA qui ont les premiers appliqué l'algèbre logique au calcul des circuits à relais.

On peut dire que ces méthodes de synthèses sont indispensables pour améliorer la sûreté de fonctionnement des ensembles automatiques qui se développent du côté sécurité.

Nous ne rappellerons pas ici les théorèmes généraux de l'Algèbre de Boole qui a été créé il y a plus d'un siècle pour donner une base mathématique aux propositions de la logique. Par contre, nous indiquons en annexe les méthodes d'optimisation : Carte de KARNAUGH Diagramme de VENNE et les méthodes de QUINE Mc CLUSKEY et CALDWELL.* Nous donnerons un peu plus loin des exemples de réalisations pour lesquelles ces méthodes ont en partie été utilisées.

* Référence [66]

Toute pile suivant ses caractéristiques et sa destination est toujours, bien entendu, un cas particulier qui nécessite l'étude d'un certain nombre d'automatismes d'interdictions ou de verrouillages. Néanmoins, à partir des systèmes de sécurité connus installés sur les piles françaises ou étrangères,* à partir aussi de l'analyse d'incidents intervenus sur certaines de ces dernières, on a essayé d'établir une liste de verrouillages à installer sur toute pile atomique.* *

Un des automatismes d'interdiction les plus importants est la mesure imposée du flux neutronique sur toutes les gammes de puissance de fonctionnement qui, pour certaines piles, peuvent être de l'ordre de 9 à 10 décades. Il est en effet fondamental du point de vue sécurité de connaître cette puissance quelqu'en soit le niveau. Le démarrage en aveugle d'une pile doit être impossible, de même que l'accès au milieu multiplicateur (modérateur, éléments combustible, etc...)

Un autre automatisme important est la limitation de libération de réactivité dans un temps déterminé. Nous en avons donné les raisons précédemment. Ceci entraîne toujours de disposer d'un certain nombre de verrouillages entre les manipulations qu'on peut faire sur les différentes barres de contrôle, compensation et sécurité.

Par ailleurs, il est aussi important de pouvoir effectuer certaines opérations sur le milieu multiplicateur : opération de chargement et déchargement, mises en place d'expériences, de réflecteurs, etc... sans disposer d'une certaine quantité d'antiréactivité suffisante susceptible d'être introduite automatiquement dans le coeur en cas d'incident.

* Référence [67] ** Référence [68]

L'accès au coeur d'une pile atomique ne sera possible, en général, qu'à la condition d'effectuer préalablement un certain nombre d'opérations, intervenant dans un ou plusieurs automatismes d'interdiction.

Ce développement d'automatismes n'est compatible bien entendu qu'avec l'utilisation d'éléments sûrs tels que les éléments statiques par exemple.

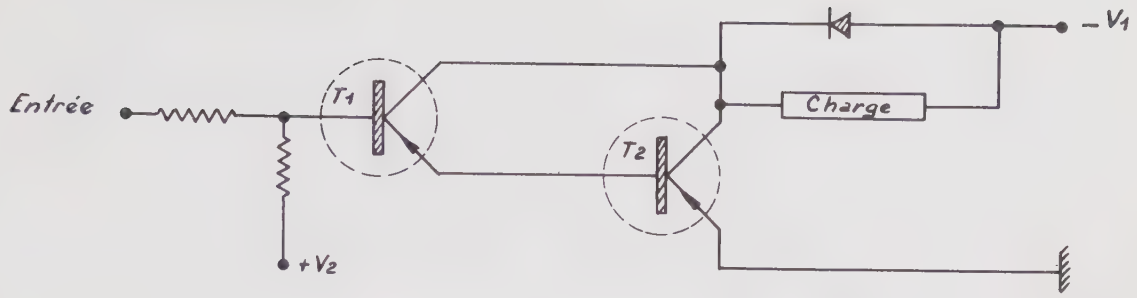
8.5. Avantages de l'utilisation des éléments statiques dans les chaînes de sécurité.

Du côté éléments statiques, les techniques qui se développent le plus sont, pour l'instant, les techniques semi-conducteurs ou magnétiques, alors que les techniques du type électronique moléculaire sont encore du domaine du laboratoire de recherche. Les avantages qu'on attend des techniques statiques, sont la sûreté de fonctionnement, la maintenance très réduite, le faible encombrement, la faible dissipation de puissance, la vitesse de réponse et l'adaptation facile à la réalisation d'automatismes d'interdiction ou de systèmes de commutation.*

La maintenance très réduite et le faible encombrement ne sont pas des impératifs fondamentaux, pour les piles de puissance nulle, à proximité desquelles on dispose très souvent de suffisamment de place pour installer les équipements de contrôle et de sécurité.

Par contre, pour les piles de puissance le problème est différent.

* Référence [69] et [70]



Elément de puissance

Fig : 8 - 28

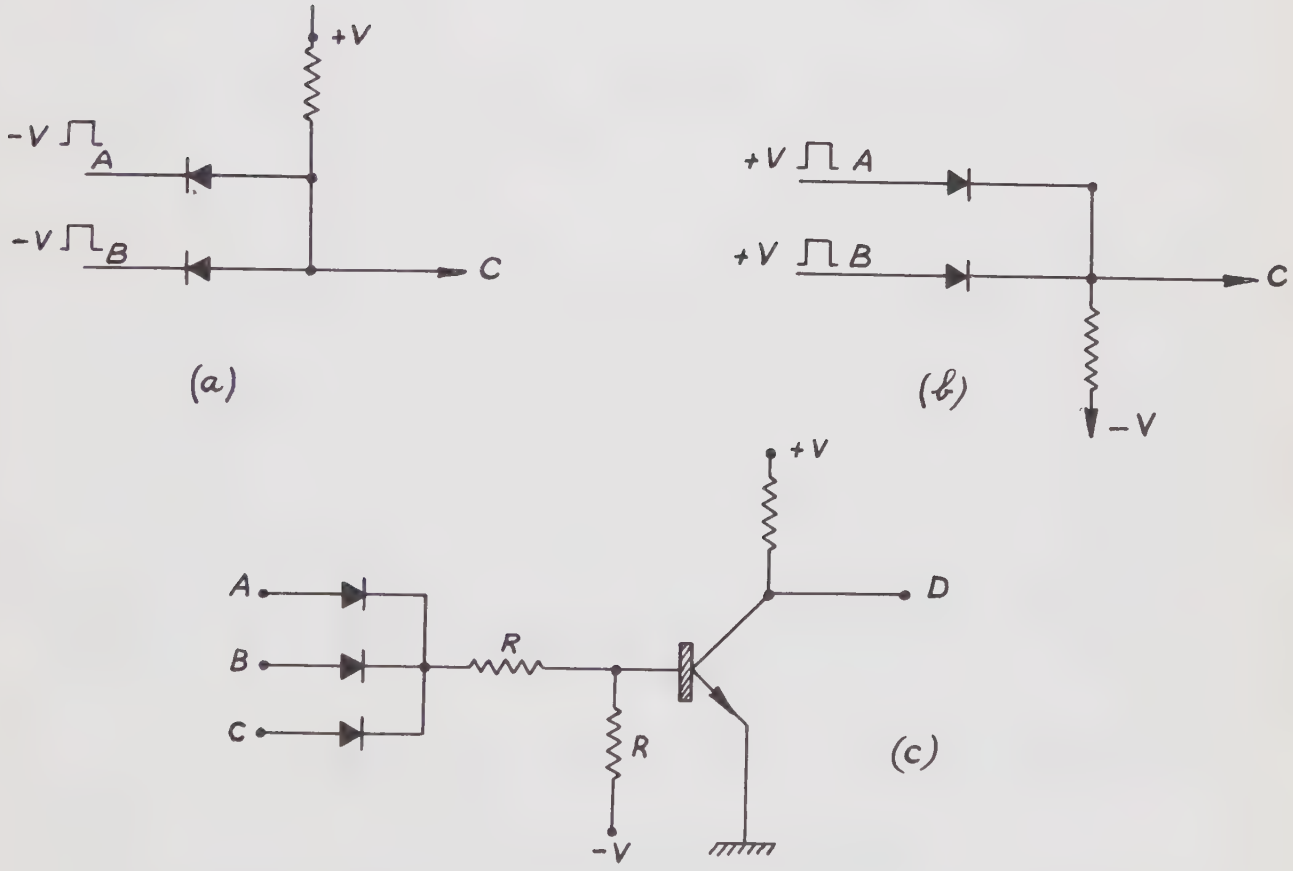


Fig. 8 - 23

La faible dissipation de puissance est intéressante bien entendu ; mais s'il n'y a pas d'erreur de conception initiale du système d'évacuation des calories produites, on peut en général y satisfaire. La sûreté de fonctionnement, la vitesse de réponse sont, par contre, des avantages très nets du point de vue sécurité.

Nous allons examiner les possibilités d'utilisation du "Solid state device" dans les différents éléments de la chaîne de sécurité, en essayant de faire ressortir ces deux derniers avantages.

8.5.1. L'utilisation d'éléments statiques dans les amplificateurs de mesures.

Pour ce qui est des amplificateurs d'impulsion utilisés dans les électroniques de comptage, l'utilisation de transistors est, comme on le sait, possible et des ensembles de comptage pour chambre à fission, ou compteur à BF3, ont été réalisés. Il faut dire que les bandes passantes des amplificateurs transistorisés sont encore quelquefois plus faibles que celles des amplificateurs à tubes et qu'il en résulte des pertes de comptage importantes à fort niveau. Par contre l'utilisation de transistors permet des liaisons en basse impédance qui sont favorables du point de vue perturbations liées aux parasites. Dans le cas de l'amplification de courant continu faible fourni par les chambres d'ionisation, il semble bien que la technologie actuelle ne permet pas de mesurer des courants inférieurs à 10^{-9} A sans utiliser un tube électromètre qui est un élément fragile.*

La voie amplificateur magnétique semble être la plus intéressante du point de vue sûreté de fonctionnement. L'industrie aéronautique, qui utilise des amplificateurs magnétiques depuis de nombreuses

* Référence [71]

années, donne souvent comme statistique de pannes : 1 par 10 années de fonctionnement. Aussi il se confirme que, s'il est plus facile de réaliser des amplificateurs de mesure "fail safe" avec des transistors, qu'avec des amplificateurs magnétiques, ces derniers tombent beaucoup moins souvent en panne. Par contre leur vitesse de réponse est souvent relativement limitée par leur bande passante étroite.

Le retard du développement de l'amplificateur magnétique, découvert en 1906 pour la mesure des courants continus, peut être imputé à la difficulté d'uniformité de performances et celle de trouver des matériaux très perméables et de pertes à courant de Foucault très faibles. La technique des tôles à grains orientés, l'adjonction de silicium, de nickel ou parfois de cobalt et de faibles quantités d'autres métaux (Cu, Cr, Mo, V), les traitements thermiques, ont permis d'atteindre des performances intéressantes.*

Les alliages à 50 p. 100 nickel (Deltamox, etc...) se distinguent par une perméabilité maximum supérieure (50 000 gauss) tout en gardant une induction de saturation assez grande (15 000 gauss) ; leur cycle d'hystérésis présente chez certains constructeurs une rectangularité très intéressante. Les alliages à plus forte proportion de nickel (76 à 79 p. 100) : Mumétal, supermalloy, se saturent plus vite (7 000 à 8 000 gauss) mais, étant de perméabilité maximum plus élevée 300 000, ils permettent de très grandes sensibilités.**

On a l'habitude de classer les amplificateurs magnétiques en deux classes :

a) Les amplificateurs à réactance saturable

b) Les amplificateurs autosaturés ou encore les amplificateurs dits de "puissance continue".

* Référence [72] ** Référence [73]

Ce sont surtout ceux de la 2ème classe qui sont utilisés pour l'amplification des courants continus.

Néanmoins, nous indiquons sur la figure 8-14 le schéma d'un amplificateur à réactance saturable dont la théorie est bien établie.

Les enroulements sont tels qu'il n'y à aucune force électromotrice induite dans le circuit continu. Les enroulements alternatifs sont tels que la saturation a lieu juste pour la tension crête, alors qu'aucun courant ne parcourt l'enroulement continu. Lorsque la polarisation continue a lieu, il y a saturation du noyau et la courbe courant de charge - courant de commande est indiquée sur la figure, dans le cas où il n'y a pas de contre réaction. Le courant de charge atteint sa limite supérieure lorsque les noyaux sont saturés (cette limite est bien entendu fonction de la résistance de charge). Ce courant est insensible au sens du courant de polarisation.

Dans le cas de la contre-réaction, un deuxième enroulement peut être utilisé pour la polarisation, enroulement à travers lequel le courant de charge passe, après avoir été redressé dans un pont à diodes. Les ampère-tours ainsi obtenus s'opposent ou s'additionnent aux ampère-tours de commande, et on a indiqué sur la figure la variation du courant de charge en fonction du courant de commande.

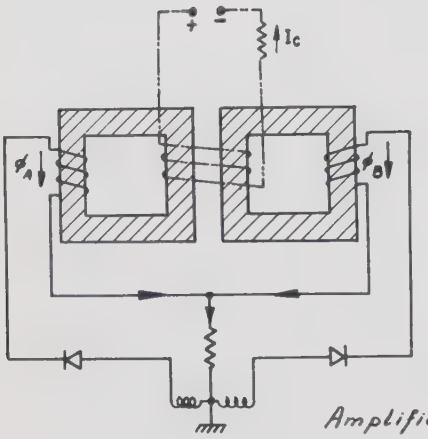
Le calcul des performances d'un tel amplificateur n'est pas toujours très précis, étant donné la complexité des phénomènes rencontrés : Courbe de magnétisation des tôles, cycle d'hystérésis et pertes par courant de Foucault, réactances de fuites et résistance des bobinages, imperfection des redresseurs.*

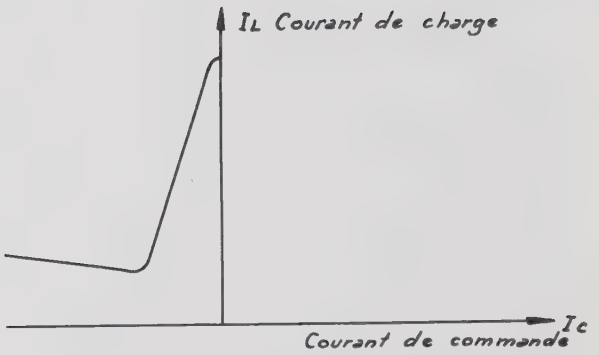
* Référence [74]

Sur la figure 8-15, nous avons indiqué le schéma de principe de l'amplificateur magnétique autosaturé, sans contre réaction extérieure. Sans application du courant continu de commande, et si les enroulements ont été bien calculés, dès le premier cycle du courant alternatif les deux tores sont saturés et la valeur de ce courant n'est limitée que par la charge (ceci découle du principe de fonctionnement de l'amplificateur à réactance saturable). Si l'on ajoute un enroulement de commande comme celui qui est indiqué, le flux de cet enroulement s'oppose au flux alternatif et contrôle le point d'attaque de l'amplificateur. La courbe du courant de charge en fonction du courant de commande a été portée sur la figure. Lorsque le courant de contrôle est nul, le courant de charge est maximum et ensuite ce courant diminue, au fur et à mesure que le courant de contrôle augmente.

Pour la mesure des courants faibles, on utilise principalement l'amplificateur autosaturé symétrique dont le schéma de principe est indiqué sur la figure 8-16. Il se compose de deux amplificateurs magnétiques autosaturés montés en push pull. Chaque tore comportant un enroulement d'alimentation alternative et un enroulement de polarisation continue.

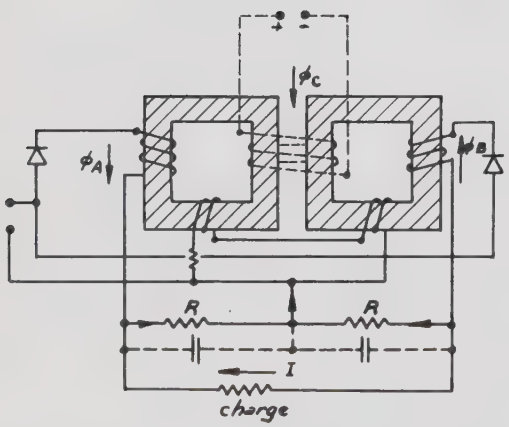
Etant donné le sens de parcours du courant continu et les diodes utilisés, le nombre de spires des enroulements de réaction est calculé de façon qu'il n'y ait pas de saturation dans les tores et que chacun d'eux ne fasse que basculer d'un état à l'autre. Les tensions aux bornes des résistances R sont alors les mêmes et aucun courant ne parcourt la charge. Lorsqu'on applique un courant de commande, il y a déséquilibre des flux dans les tores, donc déséquilibre aux bornes des résistances R, et un courant parcourt la charge. La courbe liant le courant de charge au courant de commande est indiquée sur la figure.

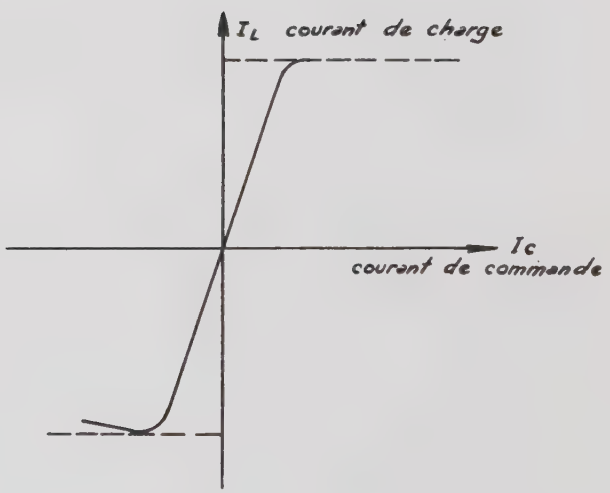




Amplificateur magnétique autosaturé sans contre réaction extérieure

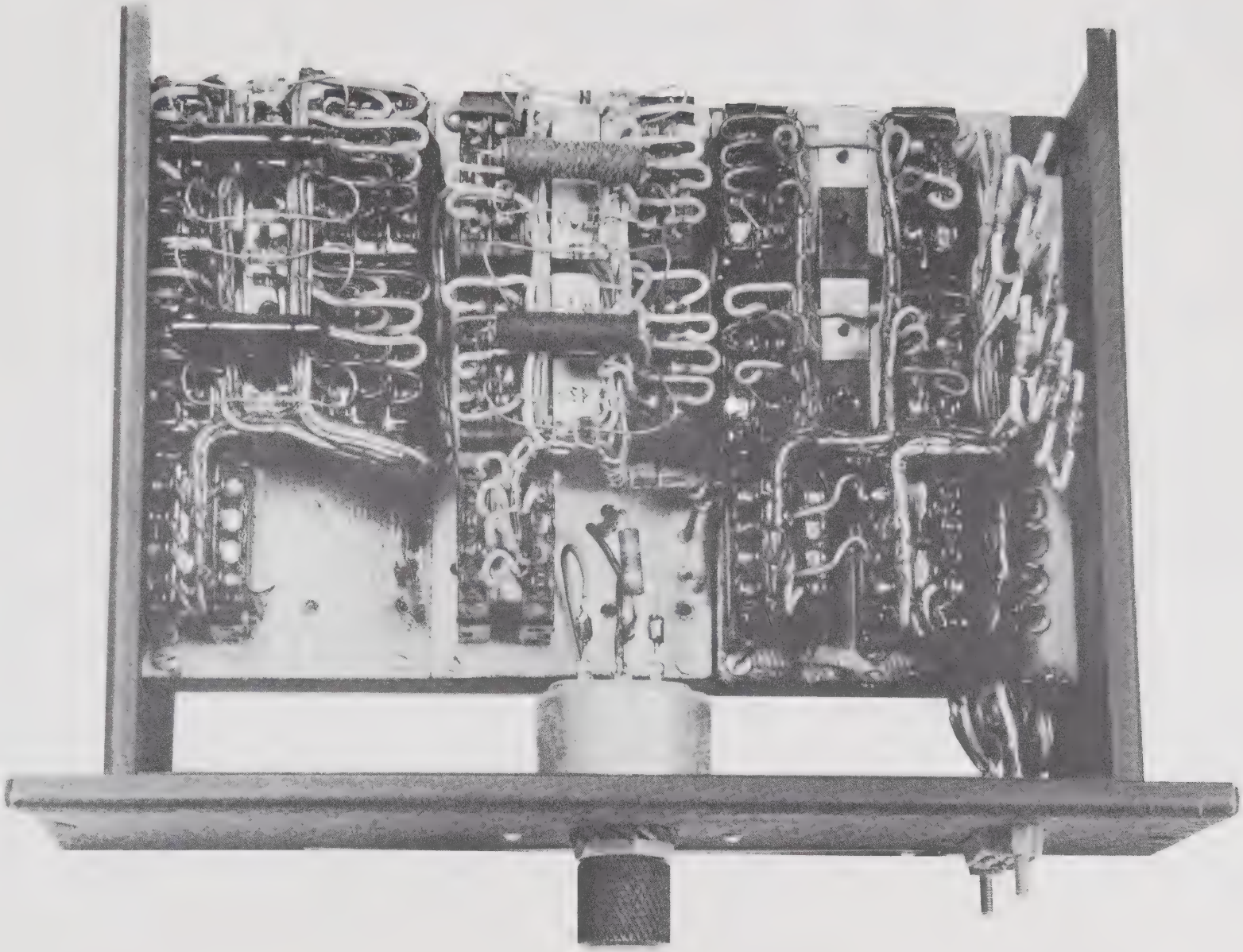
fig.: 8-15





Amplificateur magnétique autosaturé symétrique pour bas niveau

Fig: 8-16



- Fig. 8 - 17 -

Les performances d'un amplificateur de mesure utilisant plusieurs étages de ce type en cascade peuvent difficilement se calculer et l'expérimentation est nécessaire. La pratique actuelle de 4 étages en cascade est courante. Un soin très grand doit être apporté au bobinage. Les diodes au silicium utilisées bien au-dessous de leurs caractéristiques conviennent très bien. Des problèmes de stabilité se posent lorsqu'il y a plusieurs étages en cascade. L'amplificateur peut être stabilisé au moyen de circuits de réactions intégrateur et différentiateur afin de compenser la constante de temps et les retards. Il y a intérêt à avoir un circuit de puissance de faible impédance de façon que le court-circuit de charge ne l'endommage pas.

La photo de la figure 8-17 représente un amplificateur magnétique de mesure à 2 étages susceptible de mesurer un courant de 10^{-6} A pour toute l'échelle à 1 p. 100, compte tenu de la dérive entre l'ambiance et 50°C et de la stabilité.* Cet amplificateur a été réalisé pour équiper des amplificateurs statiques de sécurité que nous décrirons plus loin. Des amplificateurs du même type, à 3 étages, susceptibles de mesurer des courants de 10^{-7} A avec une précision de 1 p. 100, compte tenu des dérivés et de la stabilité, ont eux aussi été fabriqués dans le même but.

La figure 8-18 représente le schéma de principe d'un amplificateur de mesure de courant continu transistorisé à chopper.

Le signal à mesurer est découpé à l'aide d'un transistor chopper, le signal ainsi modulé est amplifié dans un amplificateur alternatif. Un transistor chopper de sortie, commandé en synchronisme avec le chopper d'entrée démodule le signal. Un intégrateur reconstitue ensuite le signal continu, une contre réaction étant finalement appliquée à l'ensemble. * *

* Amplificateur fabriqué par la Société "LEGPA"

* * Référence [75]

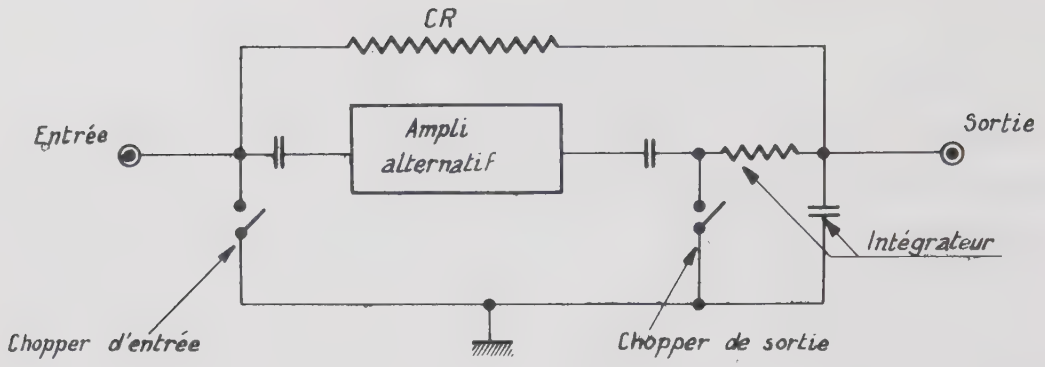


fig.: 8-18

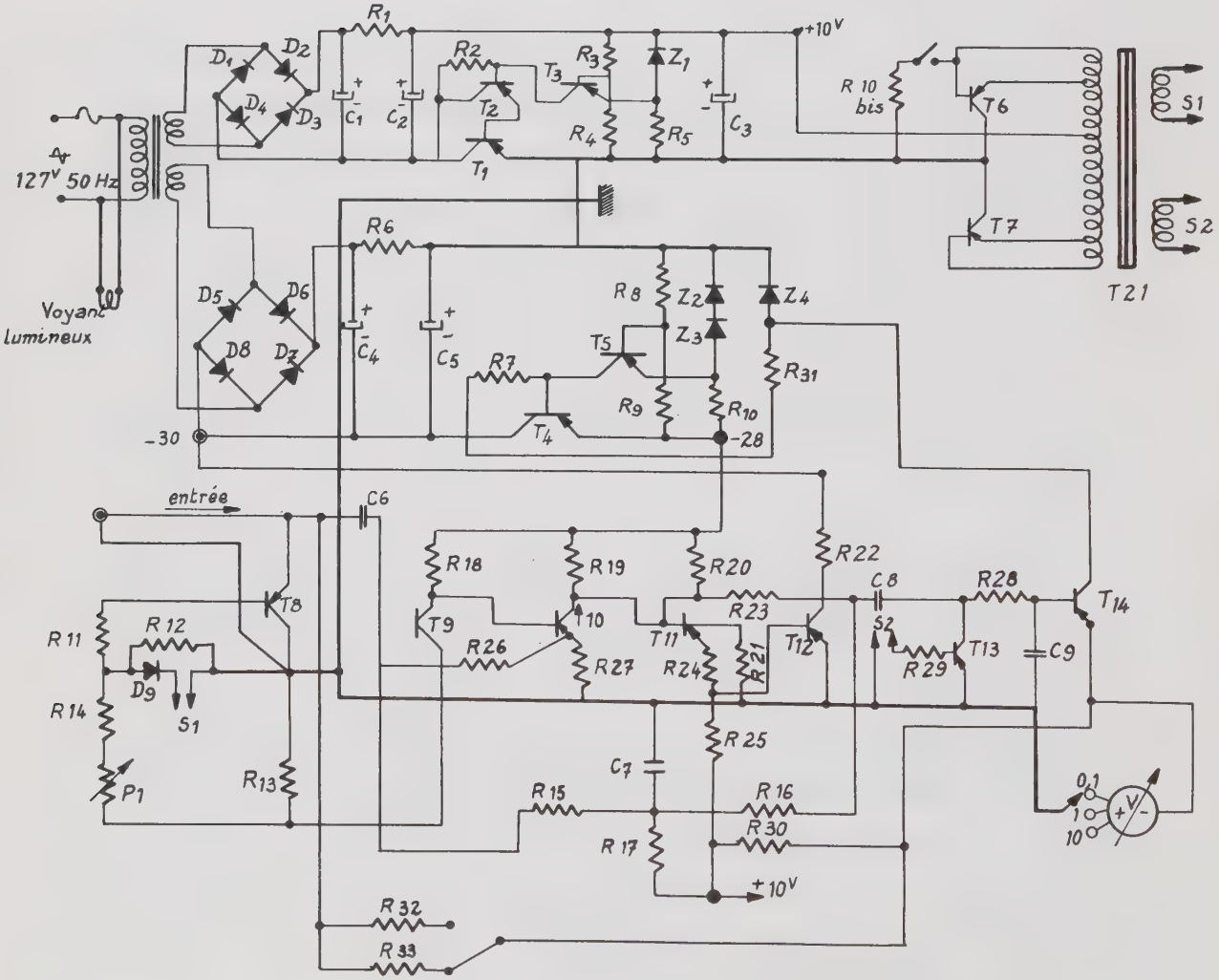
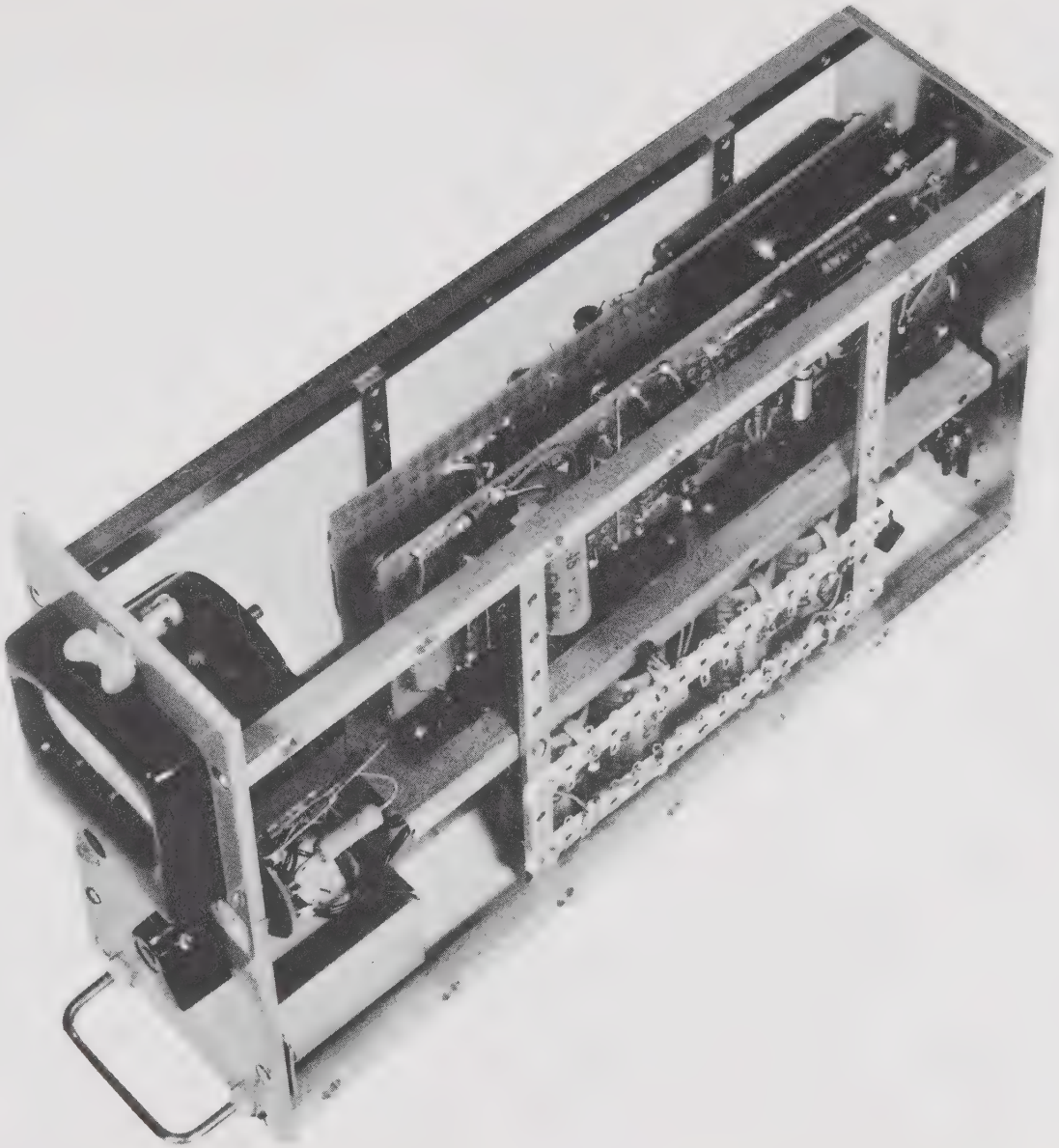


fig.: 8-19



- Fig. 8 - 20 -

Le schéma complet d'un tel amplificateur est indiqué sur la figure 8-19. On peut avoir une idée de son encombrement sur la vue de la figure 8-20.

L'impédance de transfert de cet amplificateur en boucle fermée est de 500 k Ω pour une précision de 1 p. 100. La dérive en courant est relativement importante : elle est de l'ordre de 5 10^{-8} A entre 20 et 50°C, le bruit de fond étant de l'ordre de 8 10^{-11} A, par contre la bande passante à 3 dB est égale à 80 Hz.

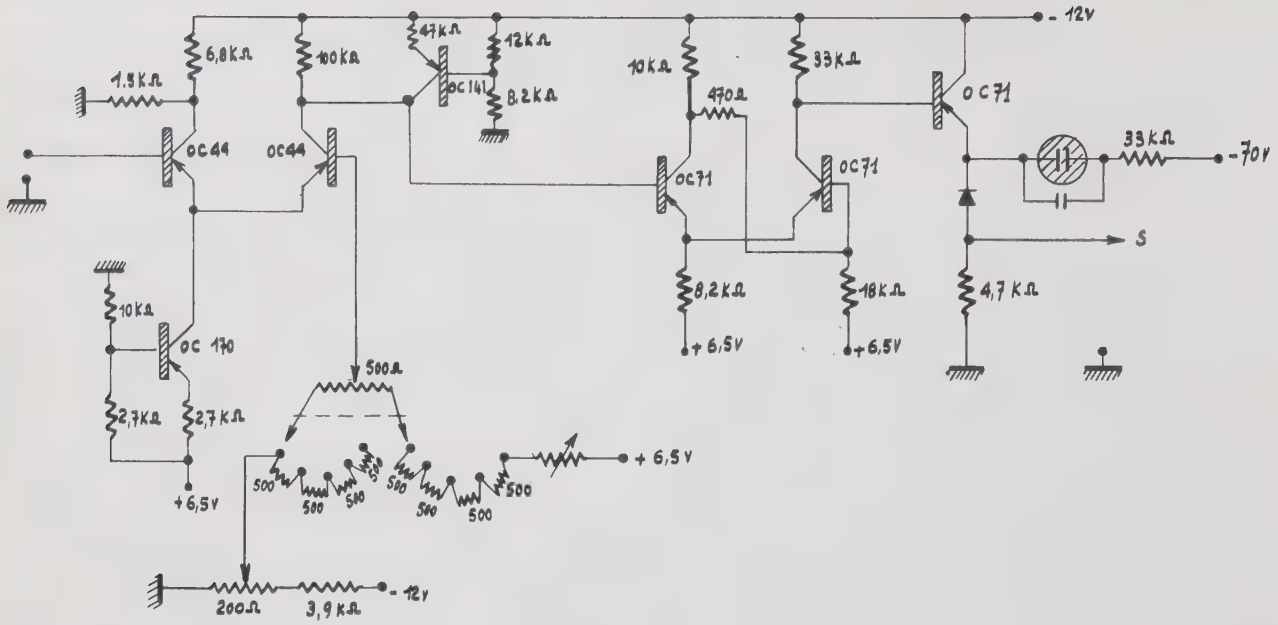
8.5.2. L'utilisation des éléments statiques dans les déclencheurs ou systèmes à seuil.

L'utilisation d'éléments statiques est ici très intéressante. On gagne beaucoup à remplacer les relais galvanométriques qu'on utilisait autrefois par des bascules à transistors par exemple, surtout du point de vue robustesse, vitesse des réponses et même consommation.

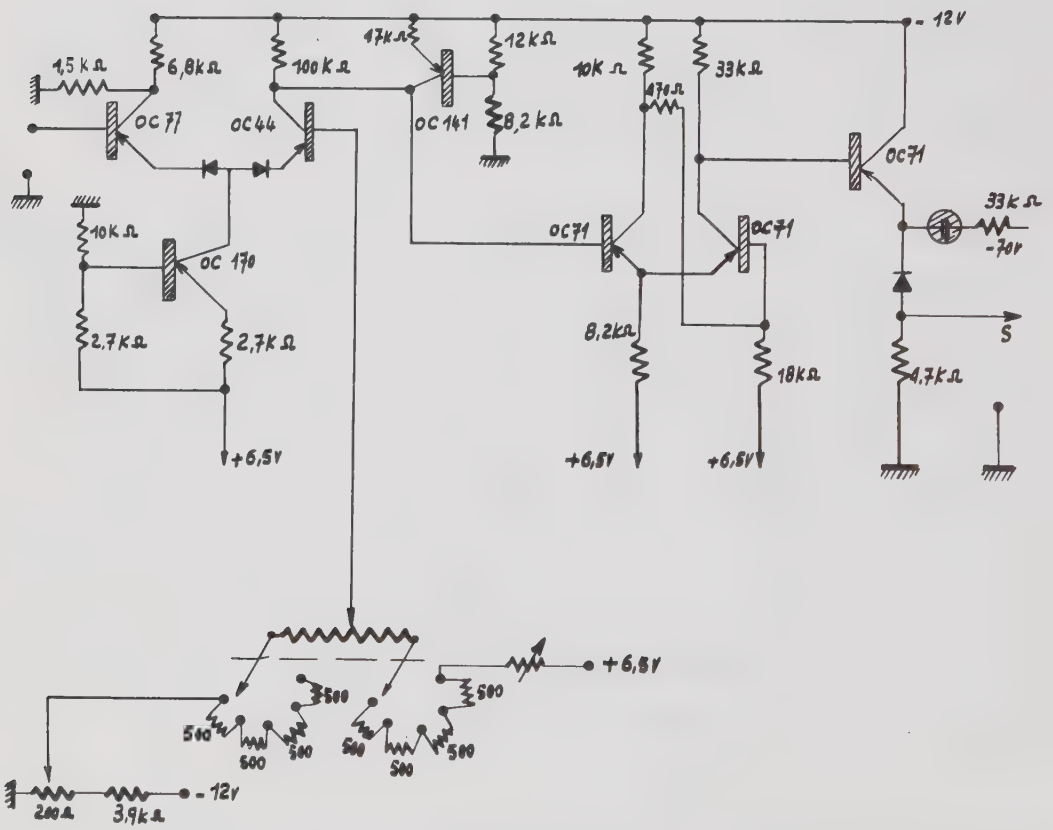
La figure 8-21 représente le schéma d'une bascule à transistor dont le fonctionnement est dérivé de celui du trigger de SCHMITT polarisé ; des montages différentiels sont utilisés pour compenser les dérives en fonction de la température. Le seuil de déclenchement est compris entre quelques mV et 10 V, la précision de la valeur de ce seuil est limitée par la tension de référence, elle est inférieure à 1 p. 100 de l'échelle totale. Le retard au déclenchement et au réenclenchement est de l'ordre de 10 μs. L'hystérésis est inférieur à 5 mV et la dérive du seuil de déclenchement en fonction de la température est de l'ordre de 500 μV / °C entre l'ambiance et 50°C. *

On peut adjoindre un circuit de protection à l'entrée au moyen

* Référence [76]

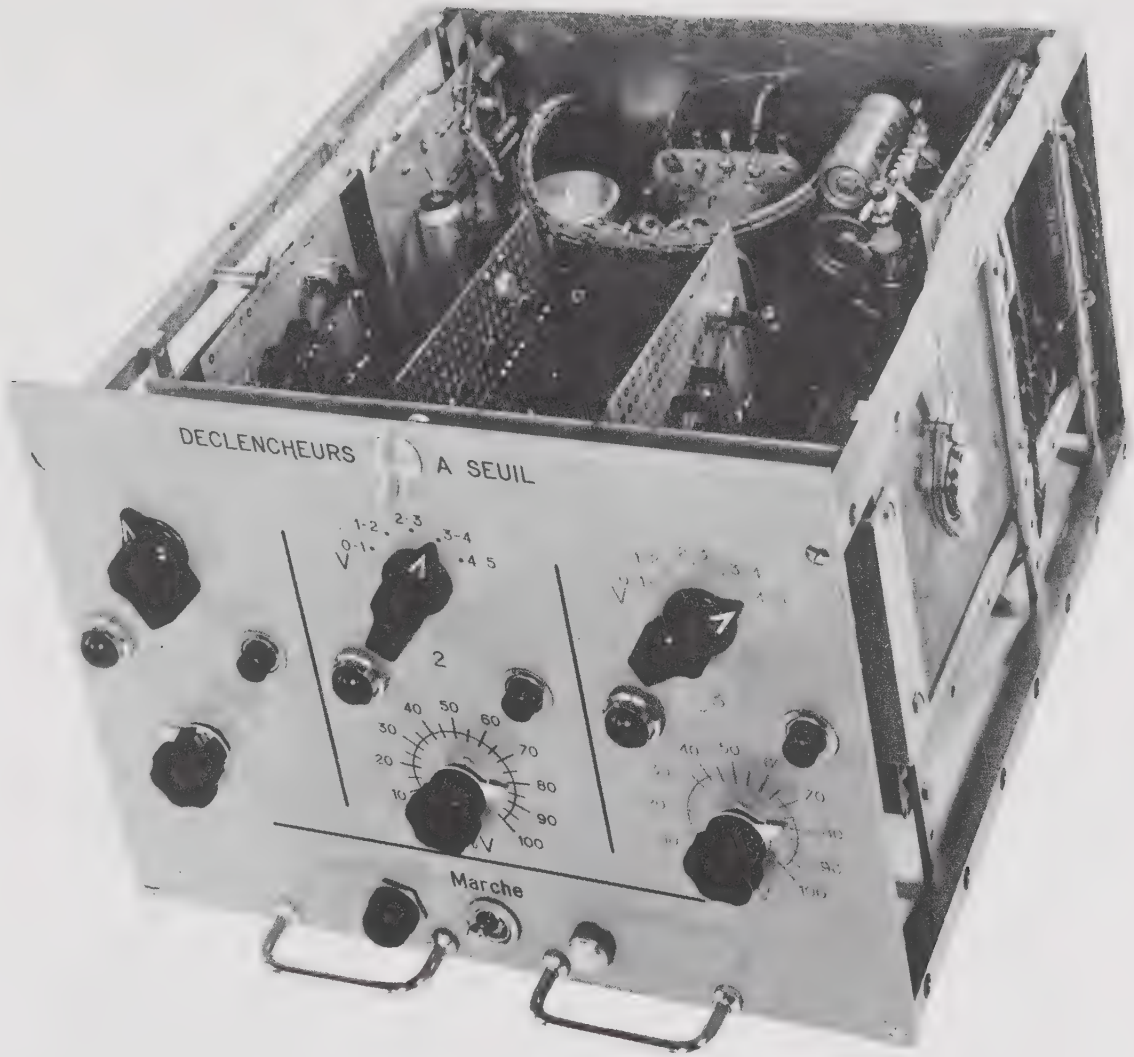


Déclencheur 0,5 v maximum 10 v à l'entrée FIG. 8 – 21



Déclencheur 0,5 v maximum 50 v à l'entrée

FIG.: 8 – 22


DECLENCHEURS
A SEUIL
0-1
1-2
2-3
3-4
4 5
V
2
40
50
60
30
70
20
80
10
90
100
V
Marche

- Fig. 8 - 23 -

de diodes comme il est indiqué sur la figure 8-22 de façon qu'en cas de surcharge les bascules puissent supporter 50 V sans détérioration.

La photo de la figure 8-23 représente un tiroir qui contient trois de ces bascules.

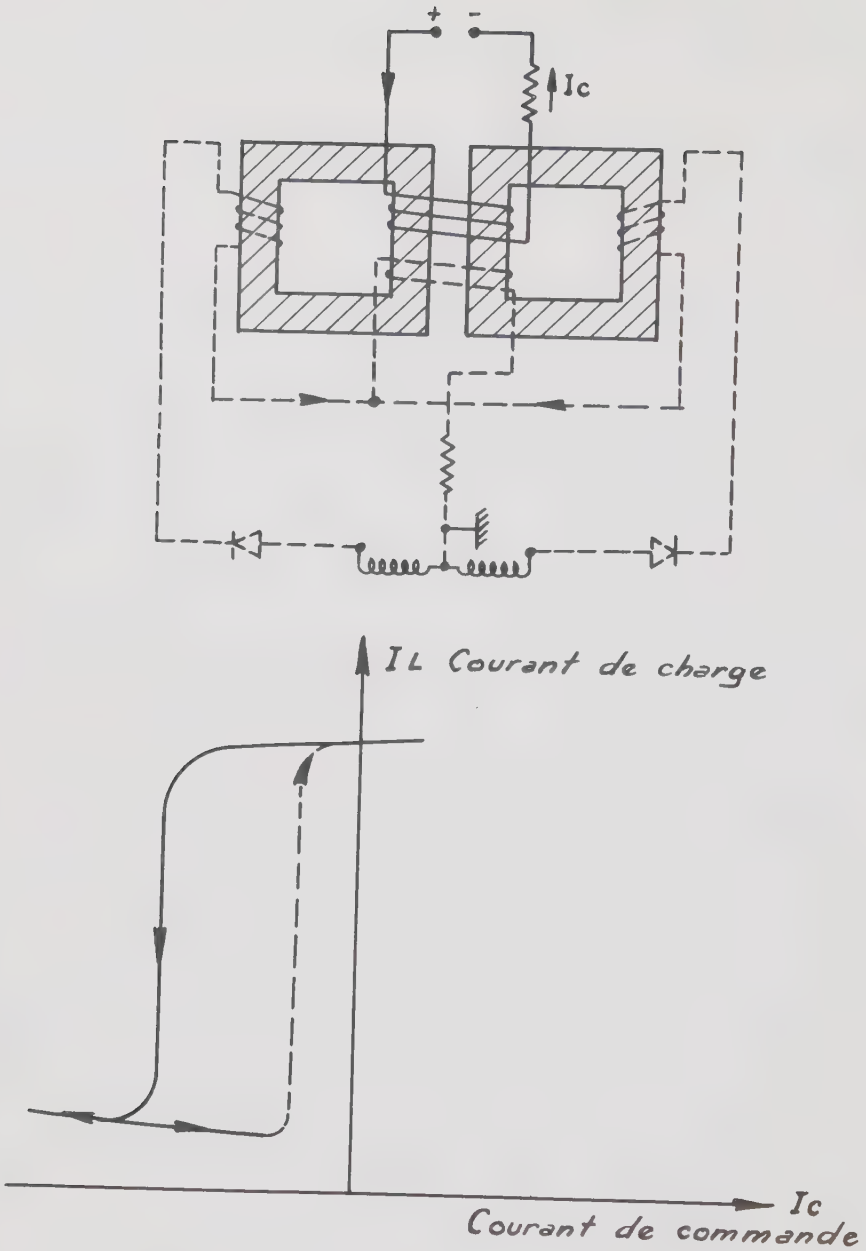
Les systèmes à seuil utilisant des bistables magnétiques présentent souvent l'avantage d'avoir une entrée isolée par rapport à la masse, ce qui rend leur utilisation plus souple. Par contre leur temps de basculement est beaucoup plus important que dans les systèmes à semi-conducteurs.*

Le schéma de principe de fonctionnement d'un tel bistable est indiqué sur la figure 8-24.

Lorsque l'on ajoute à l'enroulement de contrôle d'un amplificateur magnétique autosaturé un enroulement ou le courant de charge peut passer, le flux créé par cet enroulement s'ajoute ou se retranche du flux de contrôle et l'on a une réaction positive ou négative. Pour la contre réaction > 0, lorsque le nombre d'ampèretours augmente, on s'approche du point de basculement et il faut alors très peu d'ampèretours de commande pour que le courant de charge passe d'un maximum à un minimum. En effet on a théoriquement un gain infini. Inversement lorsque le courant de contrôle diminue, à partir d'un certain niveau, il y a une chute brutale du courant de charge. On a donc ainsi le fonctionnement bistable recherché.

Certains constructeurs ont développé des bistables du type mixte, utilisant à la fois des techniques magnétiques et semi-conducteur. On a utilisé un tel bistable dans une chaîne de sécurité que nous décri-

* Référence [77]



Amplificateur magnétique autosaturé
avec contre réaction >0 extérieure

Fig : 8-24

rons plus loin. Ce bistable comporte un amplificateur magnétique, suivi d'un trigger de SCHMITT à transistors dont le temps de basculement est de l'ordre de 25 ms pour une alimentation en 50 Hz. La figure 8-25 représente la photographie d'un déclencheur à seuil qui utilise un bistable de ce type, le seuil de déclenchement peut être réglé entre 50 mV et 50 V.

8.5.3. Remplacement des relais électromécaniques par des relais statiques.

L'utilisation des relais électromécaniques dans les dispositifs de sécurité des piles ne pose pas, pour l'instant, de problèmes difficiles en dehors de leur temps d'ouverture. Néanmoins, les relais électromécaniques tendent de plus en plus à être remplacés par les relais statiques dont les avantages sont nombreux.

Pour les relais électromécaniques sélectionnés, on sait que la manière dont ils tombent en panne est bien établie. Leur nombre de pannes est en général fonction de leur pouvoir amplificateur, il est minimum lorsque la puissance qu'ils coupent est égale à leur puissance d'alimentation, comme c'est le cas par exemple pour les relais de commutation. La fatigue du relais dans une chaîne de sécurité est faible, étant donné le nombre de manoeuvres qu'il a à effectuer, et qui, en général, n'est pas trop élevé. Le courant qui traverse ses contacts ne dépasse pas souvent quelques mA. La protection contre la poussière pourra réduire la probabilité de collage à un faible taux. Enfin la probabilité que les contacts restent soudés est faible si le relais est bien dimensionné et s'il est fermé sur une charge résistive. *

L'alimentation continue des bobinages avec risques de dété-

* Référence [78] et [79]

rioration de ces derniers est beaucoup plus ennuyeuse car ces relais travaillent en général à l'ouverture. La maintenance n'est pas toujours facile et particulièrement le nettoyage des contacts pour éviter leur oxydation pose des problèmes que l'exploitant n'arrive pas toujours à résoudre facilement.

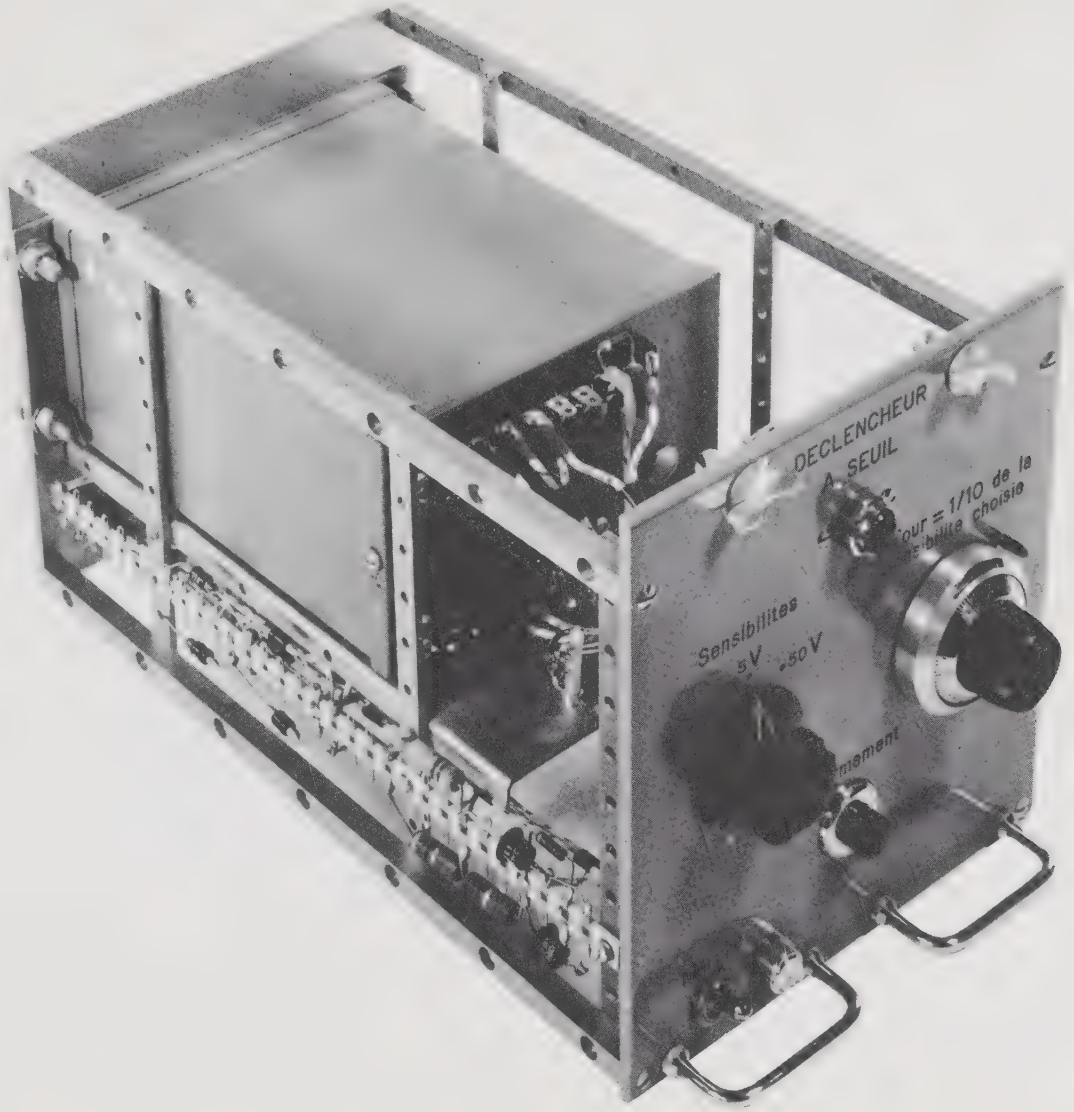
De plus, lorsque la pile exige une grande vitesse de réponse de la chaîne de sécurité, le temps d'ouverture du relais électromécanique, de l'ordre de 10 ms pour les relais de série et de 1 ms pour les relais spéciaux, n'est plus négligeable surtout si plusieurs de ces relais sont en cascade.

Enfin, on a vu que dans les chaînes de sécurité il était de plus en plus indispensable d'introduire des systèmes de coïncidences et d'anticoïncidences et souvent même de blocs logiques que certains auteurs qualifient déjà de calculateurs logiques. Il devient indispensable de réaliser des fonctions logiques, et là, il faut reconnaître que les relais électromécaniques ne permettent pas toujours de réaliser simplement des schémas logiques courants. Il est souvent difficile en effet de réaliser des combinaisons de signaux algébriques ou autres sur leur circuit d'entrée, c'est-à-dire leur alimentation. Et l'utilisation des relais statiques devient souvent indispensable. *

Toutes ces raisons militent en la faveur du remplacement des relais électromécaniques par des relais statiques.

Le type de relais statiques le mieux adapté aux chaînes de sécurité ne peut pas, bien entendu, se définir d'une manière précise, étant donné l'évolution constante du "Solid state device". Il est aussi difficile de pouvoir tirer des conclusions absolument figées sur leur

* Référence [80]



- Fig. 8 - 25 -

sûreté de fonctionnement. Il est intéressant de ce point de vue de voir se développer l'installation de ces éléments dans les industries de la métallurgie ou des mines et de suivre le comportement des installations équipées de ces éléments.

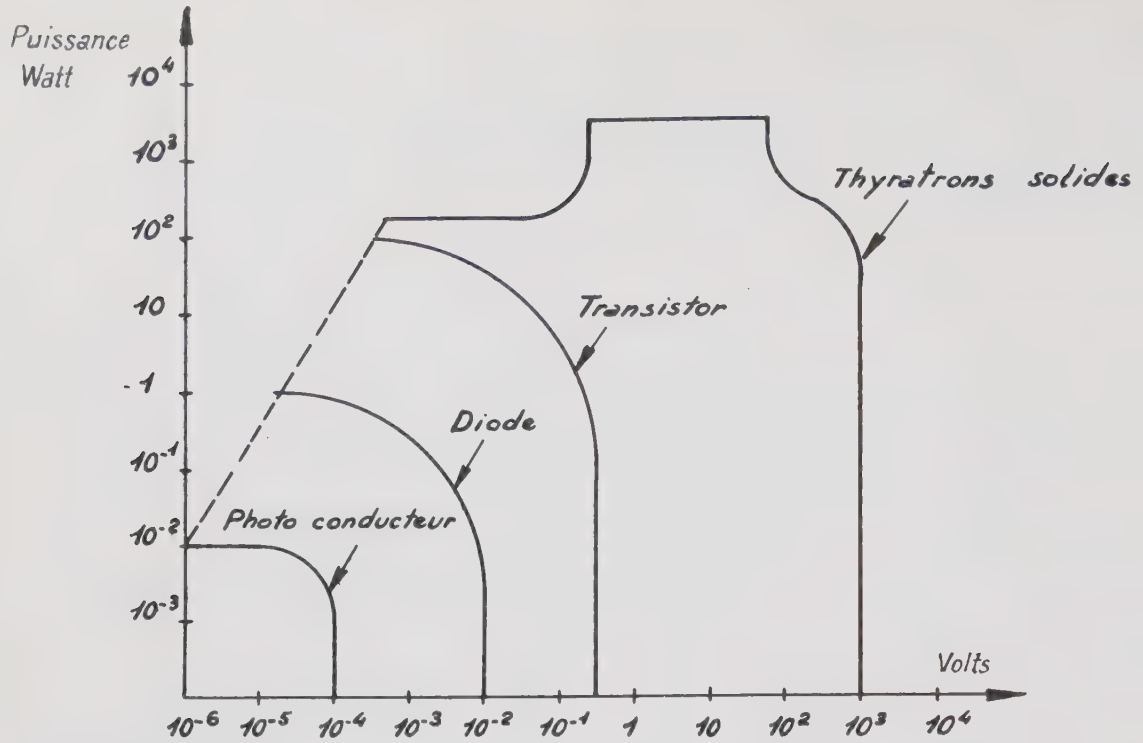
L'action de contact ouvert ou fermé peut être réalisée à l'aide de deux méthodes : la première utilise des éléments régénérateurs d'énergie tels que : le thyratron solide, le transistor, la diode tunnel, etc... La deuxième méthode utilise des éléments non régénérateurs d'énergie combinés avec des circuits régénérateurs, exemple : l'oscillateur bloqué, la bascule de SCHMITT, le multivibrateur bistable, etc...

La figure 8-26 représente les performances réalisables à l'aide de relais statiques du type semi-conducteur. *

Le schéma de la figure 8-27 représente l'élément de commutation du type NI à transistor. * *

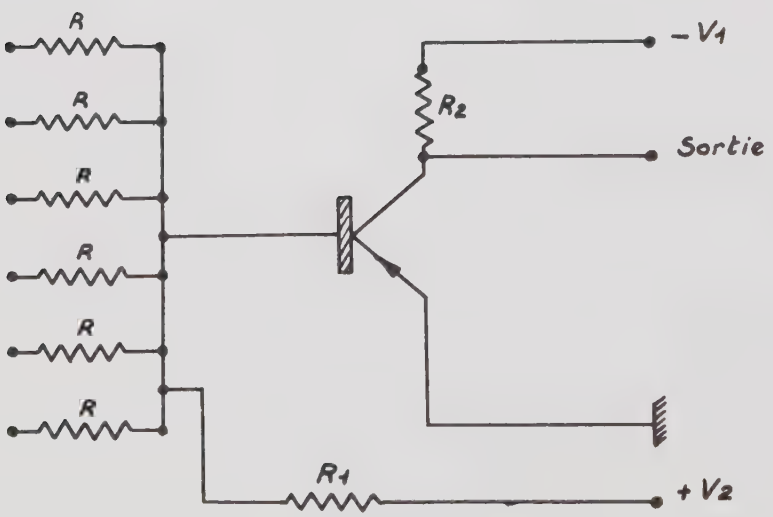
Le fonctionnement de cet élément est bien connu. Supposons qu'aucune tension ne soit appliquée sur les 6 entrées où aboutissent les résistances R, le transistor est bloqué par l'intermédiaire de la tension V_2 appliquée à sa base et le potentiel de la sortie est sensiblement égal à $- V_1$. Si un ou plusieurs signaux de tension négative sont appliqués sur les entrées (la valeur de cette tension étant voisine de $- V_1$), le transistor se sature et le potentiel en sortie tombe aux environs d'une centaine de millivolts, ce qui correspond à l'état d'interrupteur ouvert. La vitesse de commutation de passage de l'état saturé à l'état bloqué est de l'ordre de 10 microsecondes. On sait que cette vitesse est liée au temps de transit des porteurs minoritaires. Pour un

* Référence [81] * * Référence [82]



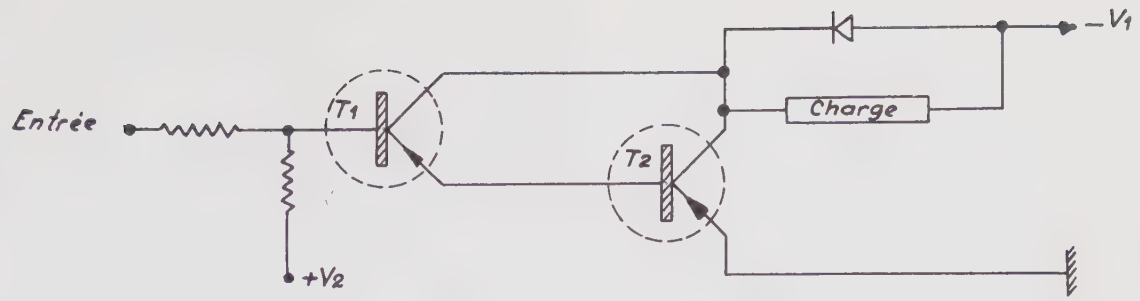
Performances des relais statiques.
(d'après Nucléonic Juillet 1960)

Fig : 8-26



Elément MI à 6 entrées

fig. : 8-27



Element de puissance

Fig : 8 - 28

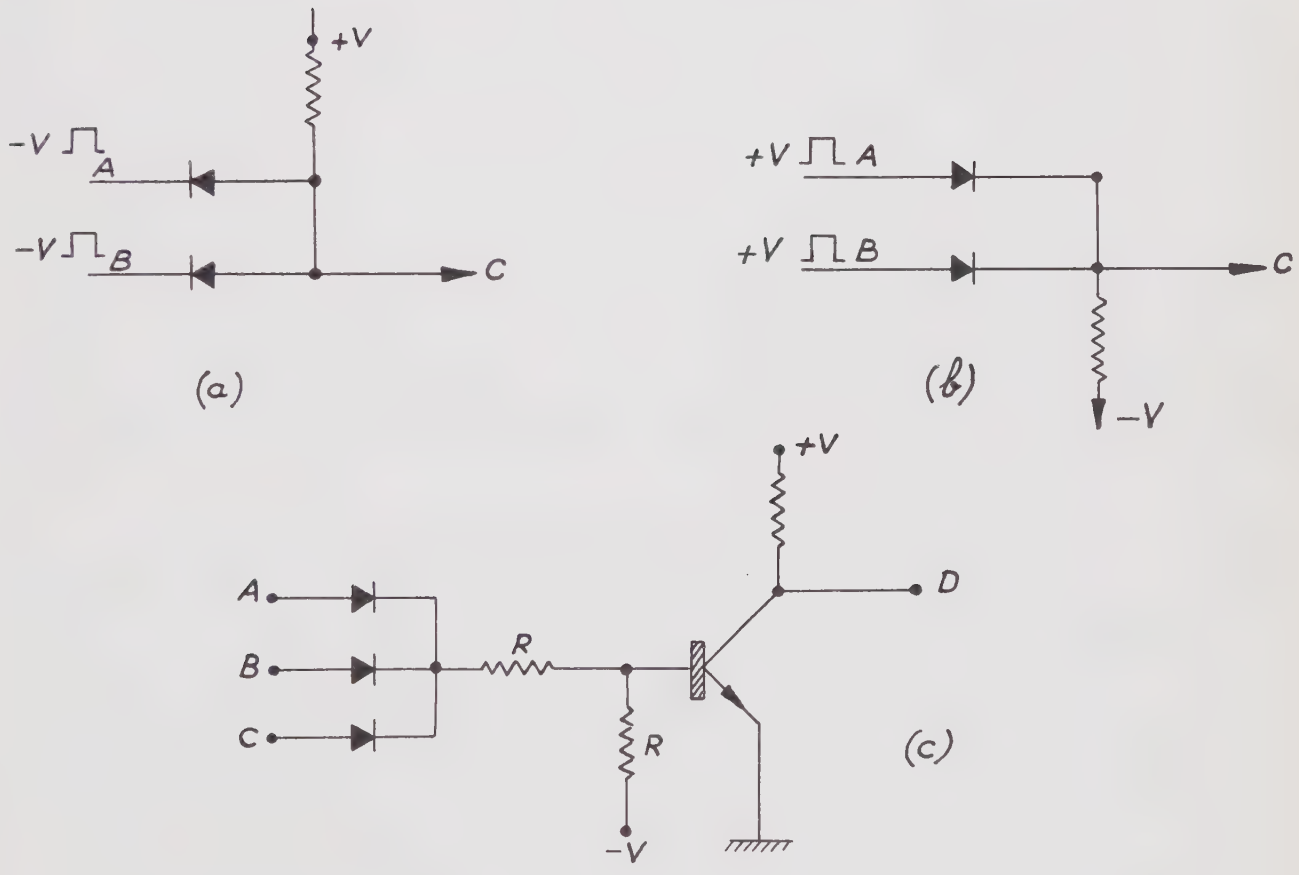


Fig : 8 - 29

transistor de type courant au germanium, la valeur de V_1 et V_2 est de l'ordre de 20 volts et le fonctionnement de l'élément est encore correct pour une variation de tension de l'ordre de 20 p. 100. La puissance commutée est de l'ordre de 1 à 2 watts. Pour la commutation de puissance plus importante, on peut utiliser des éléments dits de puissance dont le schéma de principe est indiqué figure 8-28. Ces éléments qui utilisent des transistors de puissance en cours de développement peuvent commuter des puissances de l'ordre de 100 à 200 watts sous des tensions variant entre 20 et 30 volts. *

Le fonctionnement de l'élément est simple : c'est un amplificateur de courant susceptible d'être commandé par un élément NI du type précédent. L'avantage essentiel des relais statiques du type transistor semble être la vitesse de réponse et l'alimentation qui peut être facilement réalisée à partir de batterie de secours. Ceci est important lorsque l'on envisage la continuité de fonctionnement des chaînes de sécurité. Les logiques à transistor sont plus intéressantes que les logiques à diodes étant donné que l'on a toujours un gain en puissance. On peut d'ailleurs associer diodes et transistors.

La figure 8-29 (a), représente un circuit logique du type ET réalisé à l'aide de diodes. En effet, le potentiel de C devient positif si on a à la fois une impulsion positive sur A et B. La figure 8-29 (b), représente par contre un circuit logique du type OU. En effet, il est facile de voir que si l'on a une impulsion positive, soit sur A ou sur B, le potentiel de C devient positif.

Pour les logiques à diodes contrairement aux logiques à transistor, les signaux de sortie sont de même signe que les signaux d'entrée.

* Référence [83]

On peut, bien entendu, combiner transistor et diodes. La figure 8-29 (c) représente un élément de commutation du type OU-NON réalisé à l'aide de diodes et transistor. On peut constater que le potentiel de D s'annule sensiblement lorsqu'une tension est appliquée en A, en B ou en C.

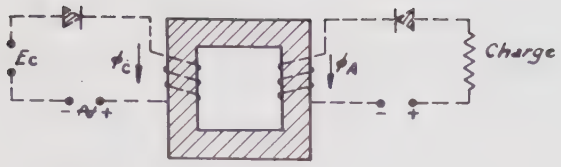
Les relais statiques du type magnétique sont susceptibles de commander des puissances de l'ordre de plusieurs kW, la résiduelle courant position repos étant en général plus importante que pour les relais à transistors. Le principe de fonctionnement de ces relais est souvent basé sur l'amplificateur dit de Ramey dont le schéma est indiqué sur la figure 8-30 ; il comprend essentiellement un noyau et deux diodes. Un enroulement dit de commande fait basculer le noyau magnétique dans un sens, l'autre enroulement le faisant basculer en sens inverse. La commande peut être réalisée au moyen d'une résistance, réactance ou tension introduite dans l'enroulement de commande. *

Lorsque l'on veut disposer de plus de puissance de sortie, on utilise alors deux noyaux magnétiques, l'amplificateur fonctionnant sur deux demi-ondes.

Le principe de fonctionnement d'un tel amplificateur est indiqué sur la figure 8-31.

Leur vitesse de réponse est dans le cas le plus favorable (amplificateur du type Ramey) de l'ordre de la demi-période de la fréquence d'alimentation, ce qui ne constitue pas une performance remarquable aux fréquences industrielles par rapport aux relais électromécaniques, mais qui peut s'améliorer avec l'augmentation de la fréquence d'alimentation. Des relais de ce type alimentés aux fréquences 50 Hz

* Référence [84]



Amplificateur magnétique ½ onde Type Ramey
(1 hertz de réponse)

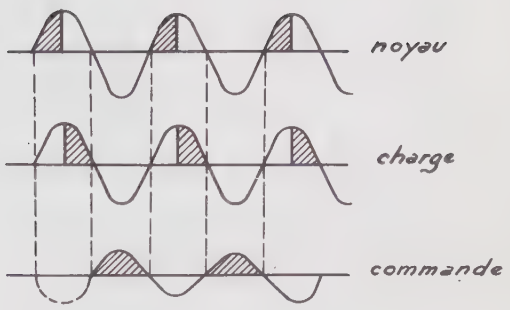
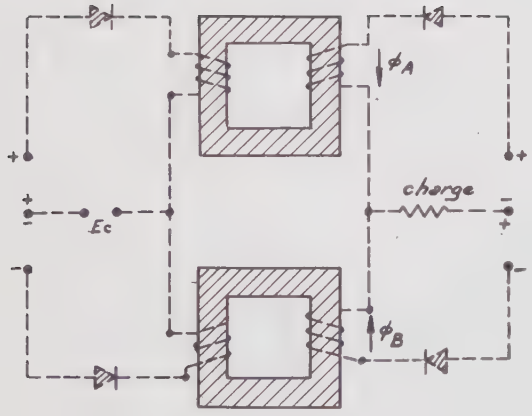
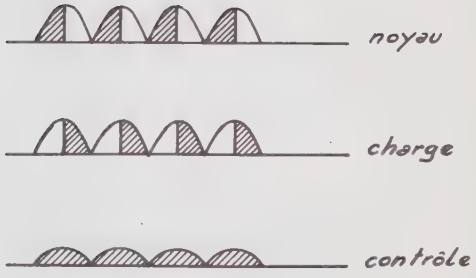


fig.: 8 – 30



Amplificateur magnétique 2½ ondes Type Ramey
(1 hertz de réponse)



Amplificateurs magnétiques Type Ramey

Fig : 8 – 31

et 400 Hz sont déjà fabriqués en série dans l'industrie.

D'une façon générale, on peut dire que les transistors et les diodes conviennent bien pour la partie commutation ou logique de la chaîne de sécurité. Les bistables magnétiques de puissance et les thyratrons solides conviennent bien aux circuits destinés à la commutation de puissance importante par exemple : l'alimentation des électro-aimants supports des barres de sécurité, Les relais statiques du type magnétique paraissent bien adaptés au bloc de verrouillages et aux automatismes d'interdiction.

Mais déjà, de nouveaux systèmes très prometteurs font leur apparition : technetrons de commutation, diodes tunnel, etc... modules à base d'électronique ~~nucléaire~~ moléculaire.

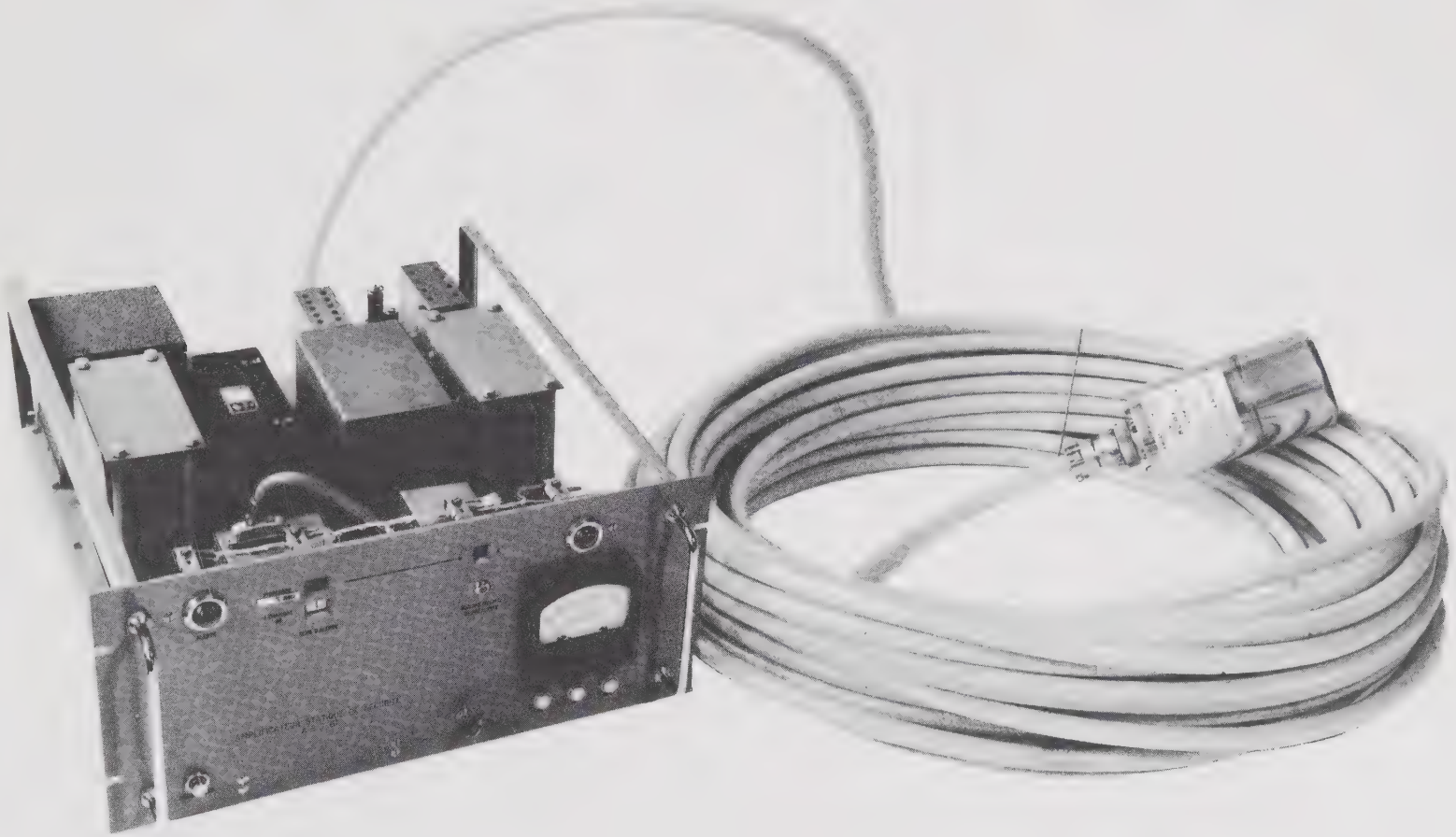
Nous allons donner quelques exemples de réalisation de chaînes de sécurité utilisant les techniques nouvelles en commençant d'abord par la partie appareil de mesures.

8.6. L'amplificateur linéaire de sécurité de niveau de puissance neutronique.

Le but de l'appareil dont on peut voir la vue sur la figure 8-32 est de réaliser une sécurité à courant du type robuste et à sûreté de fonctionnement la plus grande possible à partir d'une chambre d'ionisation sensible au flux de neutrons thermiques. *

Le détecteur de neutrons utilisé est une chambre d'ionisation à courant du type CCP 1 N 10, non compensée, susceptible de four-

* Référence [85]



- Fig. 8 - 32 -

nir un courant de 10^{-7} A à $2 . 10^{-4}$ A pour des flux de neutrons compris entre $5 . 10^{6}$ et 10^{10} n / cm^2 s^{-1} et une haute tension appliquée de l'ordre de 800 volts.

L'ensemble donne une alarme pour tout dépassement de seuil affiché par valeurs discrètes. Cette alarme se traduit par l'ouverture d'un contact et par la commutation d'une puissance de 5 W sous une tension continue de 24 volts (redressement : deux alternances).

Une préalerte dont le seuil est réglable entre 10 p. 100 et 100 p. 100 de la valeur du seuil d'alerte, est prévue. Le fonctionnement de cette préalerte se traduit aussi par l'ouverture d'un contact et la commutation d'une puissance de 5 watts sous une tension continue de l'ordre de 24 volts (redressement : deux alternances).

Le principe de fonctionnement de l'appareil est indiqué sur la figure 8-33.

Le courant fourni par la chambre d'ionisation traverse un bistable sensible du type Westinghouse. Ce bistable comprend d'ailleurs un amplificateur magnétique à réponse rapide suivi d'un bistable à transistors. A partir d'un seuil (réglable par valeurs discrètes) le bistable bascule en donnant le signal d'alarme. Le courant fourni par le détecteur traverse ensuite un amplificateur de mesure du type LEGPA 1 µA pour toute l'échelle à 1 p. 100. A la sortie de cet amplificateur sont branchés un appareil de mesure à cadran et un bistable destinés à fournir le signal de préalerte, dont le seuil de déclenchement est réglable de 5 p. 100 en 5 p. 100 du seuil de déclenchement de l'alerte.

L'amplificateur magnétique est alimenté à partir d'une ten-

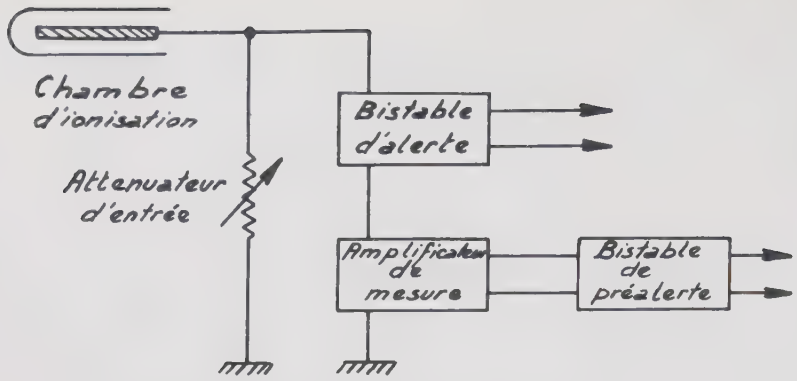


Fig : 8-33

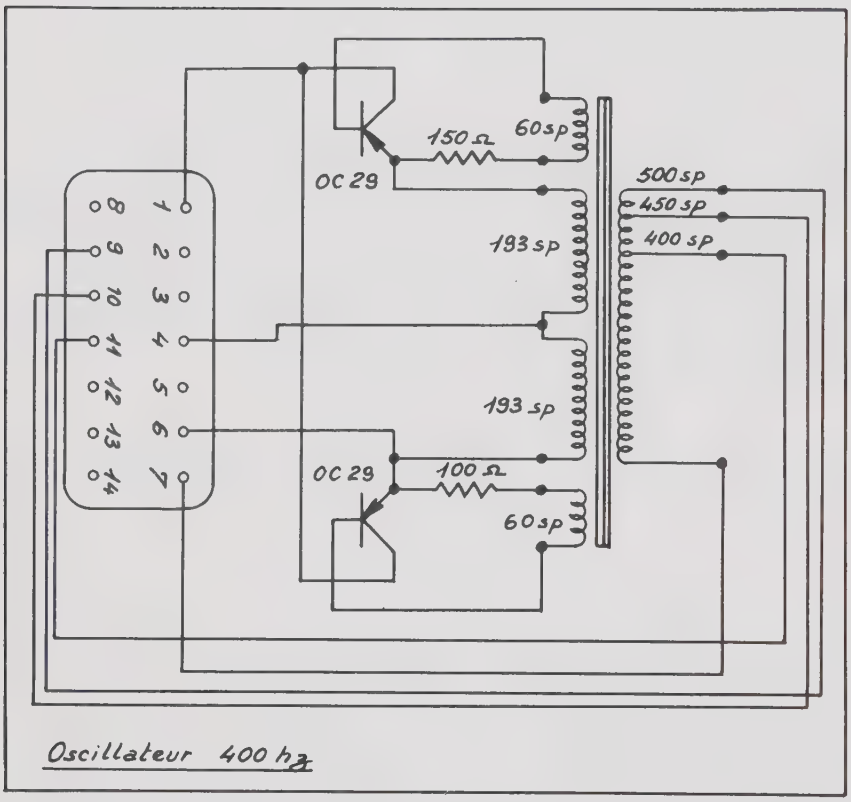


Fig : 8-34

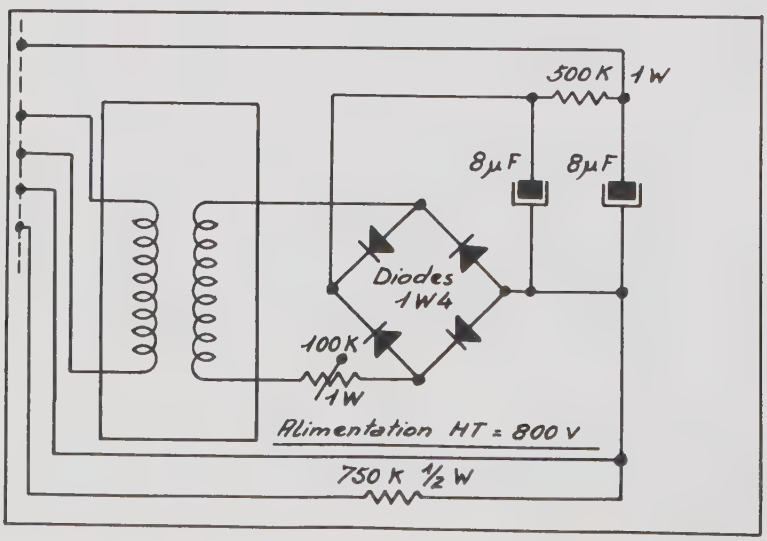


Fig : 8-35

sion rectangulaire 400 Hz fabriquée à l'aide d'un oscillateur à transistors (voir figure 8-34). Ce 400 Hz sert d'ailleurs aussi à fournir à l'aide d'un transformateur et une cellule de filtrage la H. T. détecteur (voir figure 8-35).

Une alimentation stabilisée à transistors alimente l'ensemble oscillateur 400 Hz, et circuits de polarisation des deux bistables (voir figure 8-36).

L'alerte et la préalerte fonctionnent lorsque le 800 volts destiné au détecteur n'est plus fourni à ce dernier, ou lorsque le détecteur n'est pas branché à l'amplificateur statique de sécurité.

Les différents réglages sont internes à l'appareil. Ne subsistent sur la face avant qu'un bouton de réarmement et qu'une clef permettant d'effectuer le test de bon fonctionnement, la pile étant à l'arrêt ou en marche.

La précision sur les seuils de déclenchement est de 2 p. 100 pour des valeurs de courant supérieures à 10 μA ; la vitesse de réponse est $\leqslant$ 25 millisecondes pour un signal sont appliqué égal à 105 p. 100 du seuil de déclenchement choisi.

8.7. Le limiteur d'évolution de puissance neutronique.

L'appareil est destiné à asservir la puissance d'évolution de la puissance neutronique d'une pile atomique, suivant une loi en fonction du temps préalablement fixée. En tant qu'appareil intervenant dans la chaîne de sécurité, il interdit les évolutions de puissance se faisant avec une période trop courte. *

* Référence [86]

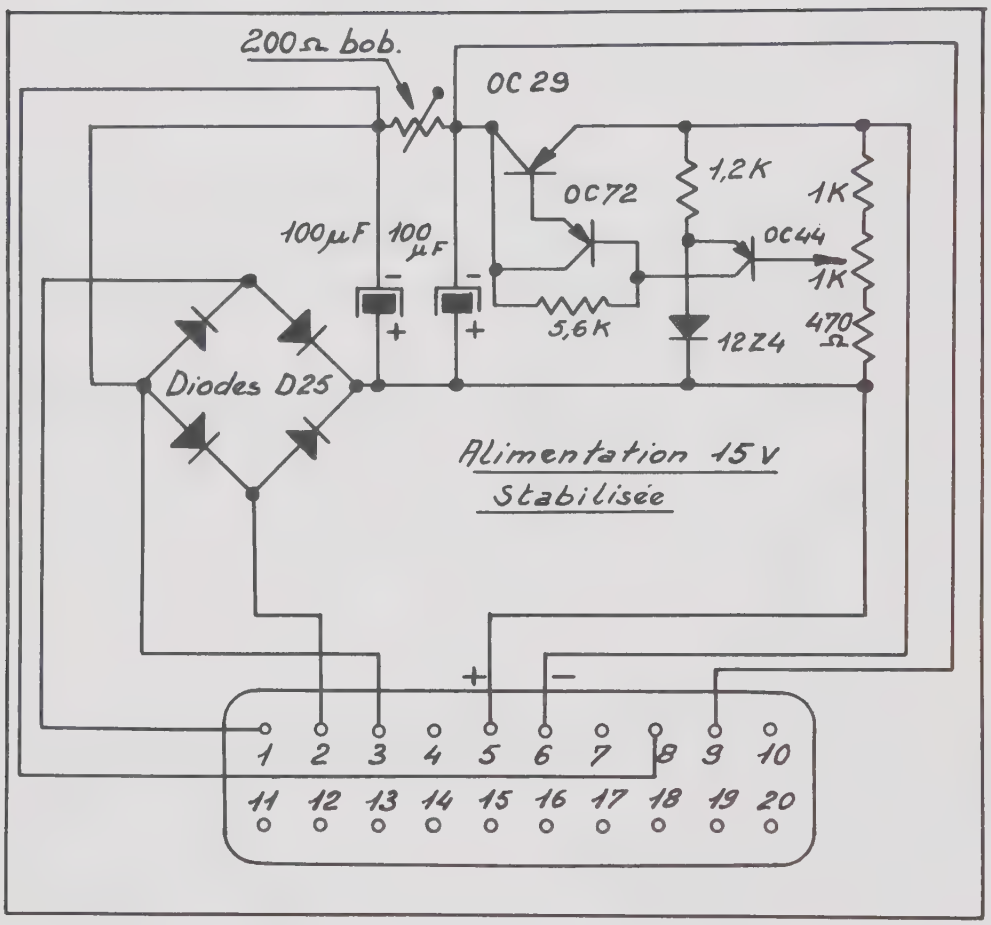

200Ω bob.
OC 29
OC72
1,2K
1K
OC44
1K
470 Ω
100µF
100µF
5,6K
12Z4
Diodes D25
Alimentation 15 V
Stabilisée
+
−
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

Fig : 8-36

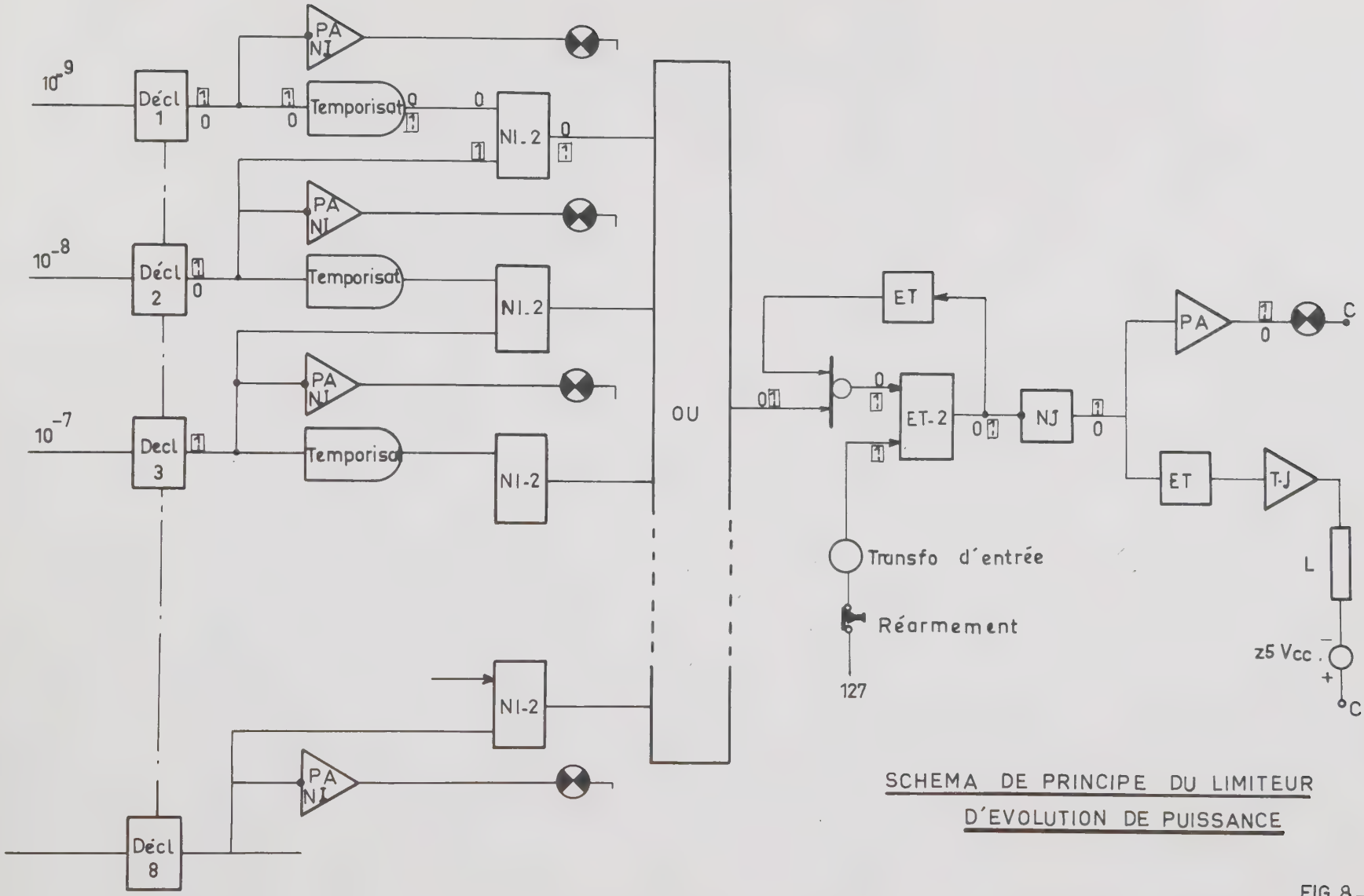
L'appareil n'est autre qu'un calculateur de limitation d'évolution de puissance. Il se place à la sortie d'un appareil de mesure d'une grandeur physique liée à la puissance neutronique : le plus souvent le flux neutronique. Lorsque ce paramètre évolue d'un seuil à un autre, préalablement fixé dans un temps inférieur à un temps préréglé, un signal est émis qui peut être utilisé pour agir sur le contrôle ou les dispositifs de sécurité de la pile.

L'appareil comprend essentiellement deux sortes d'éléments statiques :

a) Des bascules à seuil réalisées à l'aide de bistables magnétiques attaqués par le signal de sortie d'un amplificateur logarithmique de courant délivré par une chambre d'ionisation.

Le seuil de déclenchement de chaque bascule correspond ici à une décade de courant de mesure (ce seuil est d'ailleurs réglable au moyen d'un enroulement de polarisation).

b) Les éléments logiques : ils réalisent la partie calculateur du limiteur d'évolution de puissance. Ce sont eux qui permettent d'élaborer un signal lorsque l'évolution de la puissance est plus rapide que l'évolution permise. Le schéma de principe de l'appareil est indiqué sur la figure 8-37. A la mise sous tension les bistables émettent le signal logique 1, soit 10^{-9} A, la valeur du courant de déclenchement du premier bistable. Ce bistable basculera et émettra en sortie le signal 0 lorsque cette valeur de courant aura été atteinte. Le second bistable basculera pour la valeur de courant 10^{-8}A, le troisième pour 10^{-7} A, etc ....



SCHEMA DE PRINCIPE DU LIMITEUR D'EVOLUTION DE PUISSANCE

FIG 8-37

Les bistables commandent des temporisateurs qui ne sont autres que des éléments logiques NI dont le signal de sortie apparaît ou disparaît à partir de l'application du signal d'entrée après un retard réglable. On voit sur la figure 8-37 que le signal de sortie disparaît lorsqu'un seul des éléments NI à deux entrées fonctionne. L'élément NI fonctionne lorsque le seuil de basculement du bistable est atteint et que le signal de sortie du temporisateur du bistable précédent n'est pas encore passé de 0 à 1 ; ou autrement dit, quand deux seuils successifs de bistables sont atteints dans un intervalle de temps inférieur à $\triangle t$. Dès qu'un élément NI à deux entrées a fonctionné, la disparition du signal est mise en mémoire. Dans le cas contraire, si les seuils sont atteints dans un intervalle de temps supérieur au retard $\triangle t$ affiché, le temporisateur correspondant au premier seuil aura changé son signal de sortie avant que le signal logique 1 disparaisse de la deuxième entrée de l'élément NI et ainsi le signal de sortie ne disparaîtra pas.

Le temps de réponse se déduit aisément de l'examen de la figure 8-38. Dans le cas d'une évolution exponentielle de la puissance suivant la relation :

$$N = N_o \ e^{t/T}$$

et où les bascules successives ont leurs seuils réglés par décade de courant de l'amplificateur logarithmique, la période minimum choisie ne pourra être détectée qu'au bout du temps $\triangle t$ tel que :

$$\triangle t = 2,3\ T_{\text{minimum}} = 3,32\ T_{\text{doublement minimum}}$$

On voit donc que plus la période minimum choisie est grande, plus le retard de l'appareil sera important. Par contre, l'appareil réagira d'autant plus vite que la période minimum sera courte.

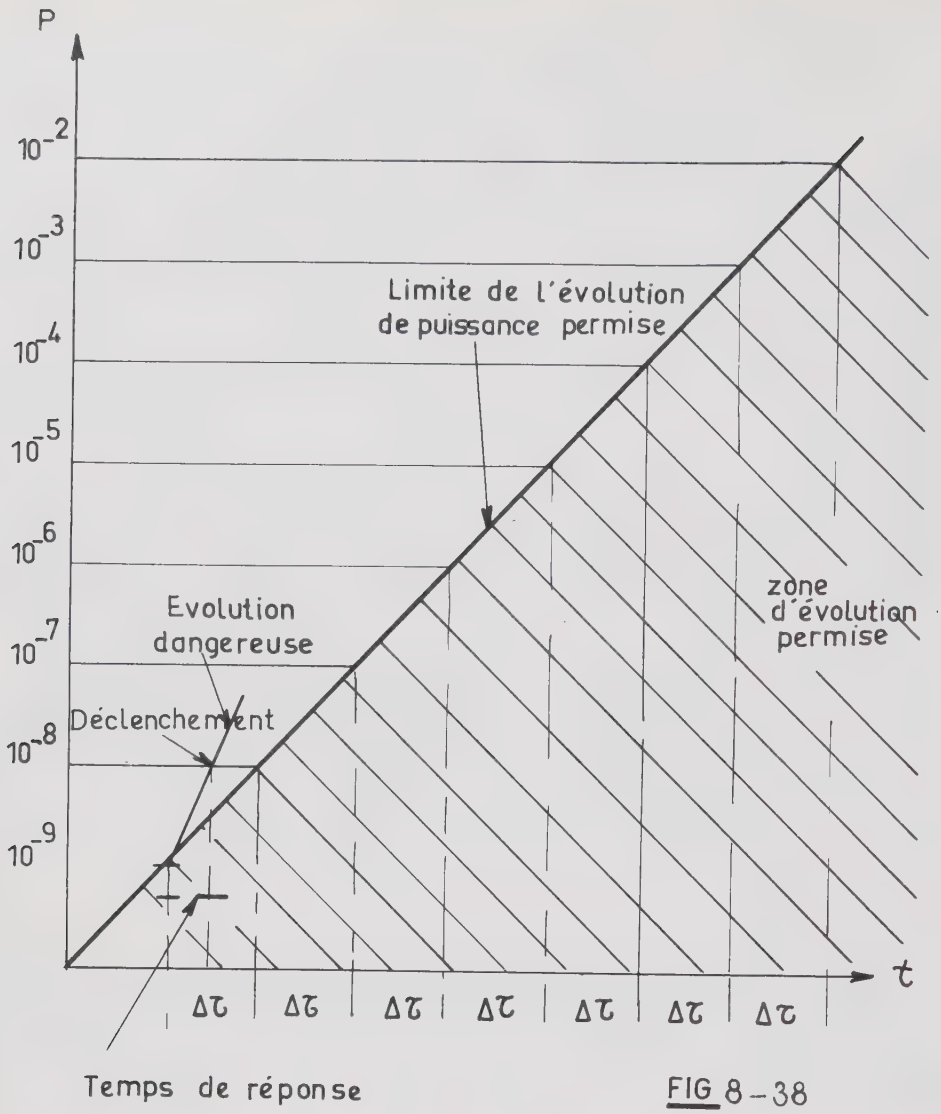
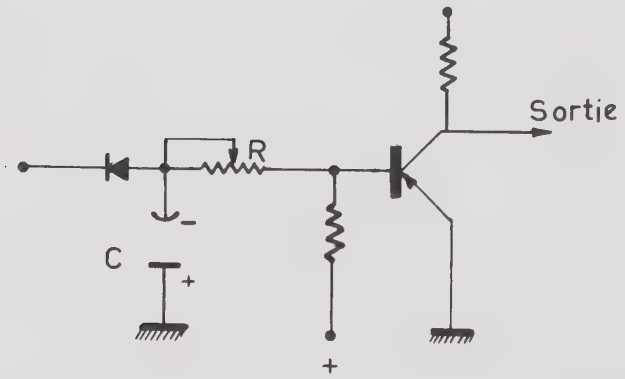


FIG 8-38



ELEMENT TEMPORISATEUR

fig.: 8_39

Ainsi, pour T_{mini} = 1 s $\quad \triangle t = 2,3$ s

pour T_{mini} = 0,1 s $\quad \triangle t = 0,23$ s

Les éléments bistables du type Westinghouse sont essentiellement constitués d'un amplificateur magnétique à réponse rapide suivi d'un amplificateur bistable à transistors que nous avons déjà décrit.

Les éléments logiques sont du type logique magnétique Cypak Westinghouse. L'élément de base étant l'amplificateur magnétique à autosaturation du type Ramey. La logique étant réalisée au moyen de diodes et l'amplificateur ne servant qu'à régénérer le signal logique.

Les éléments temporisateurs sont du type transistor dont le schéma de principe est indiqué sur la figure 8-39.

La temporisation réalisée à l'aide d'un circuit R.C. peut être réglée de 1 à 30 secondes. Cette temporisation n'a lieu que lorsque le signal d'entrée passe de 1 à 0. Les éléments de réglage des circuits R.C. se trouvent à la partie arrière du tiroir qui contient les éléments logiques. La précision des temporisateurs est de $\pm$ 3 p. 100 pour une variation de la tension d'alimentation de $\pm$ 10 p. 100.

L'appareil comprend deux tiroirs du standard C.E.A. (voir photographie de la figure 8-40) : le tiroir éléments logiques sur la face avant duquel ne se trouve que le bouton de réarmement ou de vigilance et le tiroir des éléments bistables qui ne comporte sur la face avant qu'un certain nombre de voyants correspondant aux différents seuils des bascules.

8.8. Exemples de réalisation de chaînes de sécurité.

Nous allons ici donner deux exemples de réalisation qui concernent principalement la partie bascules, commutation et bistables de puissance. Le premier exemple concerne une chaîne du type transistorisé. *

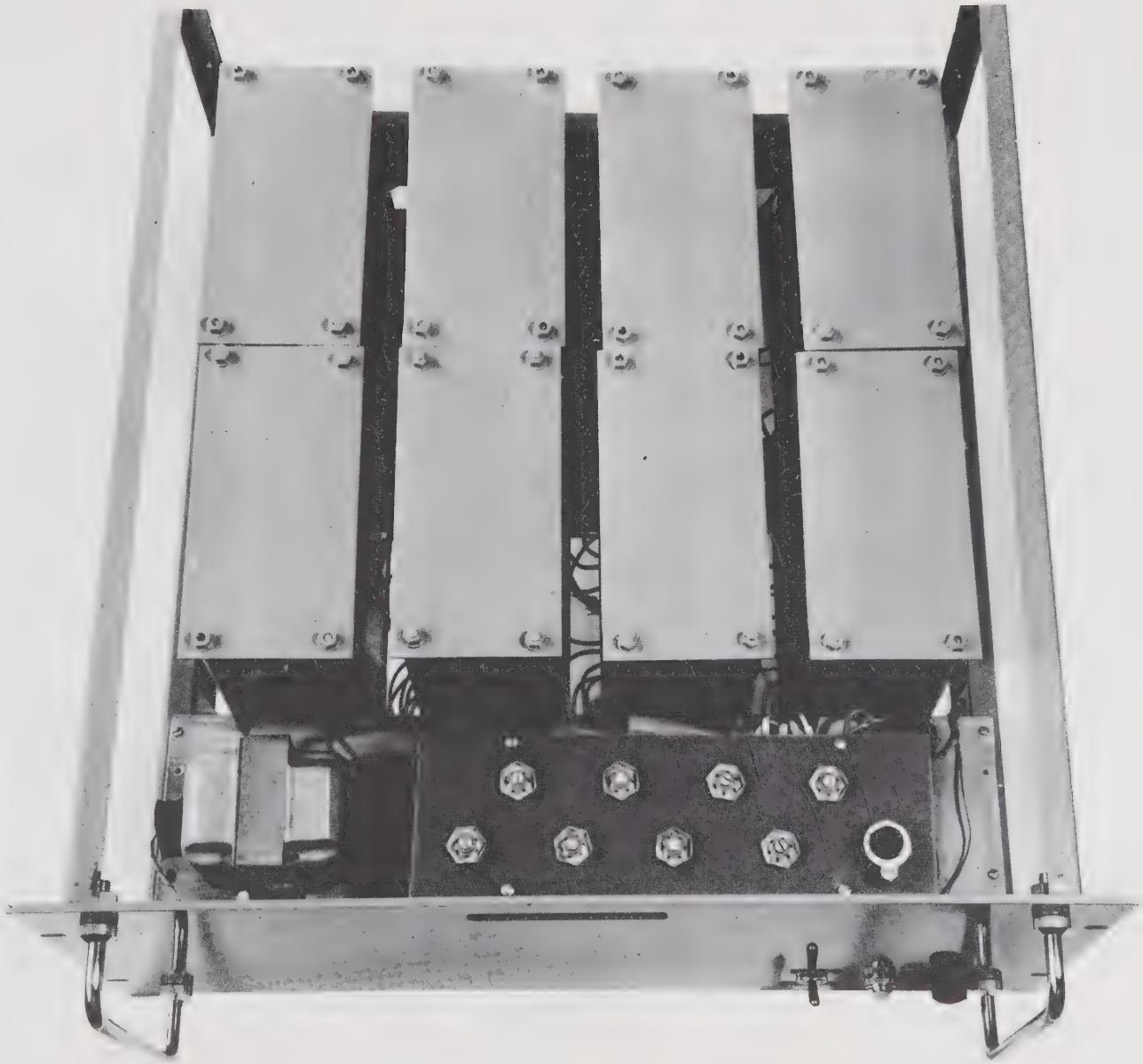
Le schéma de principe de cette chaîne est indiqué sur la figure 8-41. Pour la simplification de réalisation, seule la chute des barres a été prévue. La chaîne de sécurité est élaborée ici à partir de 8 chaînes de mesures nucléaires : 2 chaînes de démarrage, 3 chaînes de mesure basse puissance, 3 chaînes de mesure haute puissance.

Sur les chaînes de démarrage, il y a une sécurité sur la période par dépassement de niveau sans coïncidence. Cette sécurité est automatiquement supprimée à l'aide de l'inhibiteur, dès que les chaînes basse puissance indiquent un certain niveau de flux.

Sur les chaînes haute puissance, il y a aussi une sécurité sur la période et la puissance par dépassement de niveau avec coïncidence du type 2/3. L'automatisme de la sécurité est fait avec un nombre relativement faible d'éléments. Il est indispensable d'utiliser, à l'entrée des blocs logiques, des éléments appelés déclencheurs. Ces déclencheurs sont le plus souvent branchés à la sortie d'appareils de mesure qui, en général, fournissent un signal sous forme analogique. Lorsque ce signal atteint une certaine valeur qui correspond au seuil de déclenchement du déclencheur, celui-ci émet un signal binaire à l'entrée du bloc logique.

Il faut disposer bien entendu d'un déclencheur par seuil. Il

* Référence [76]



- Fig. 8 - 40 A -

- Fig. 8 - 40 B -

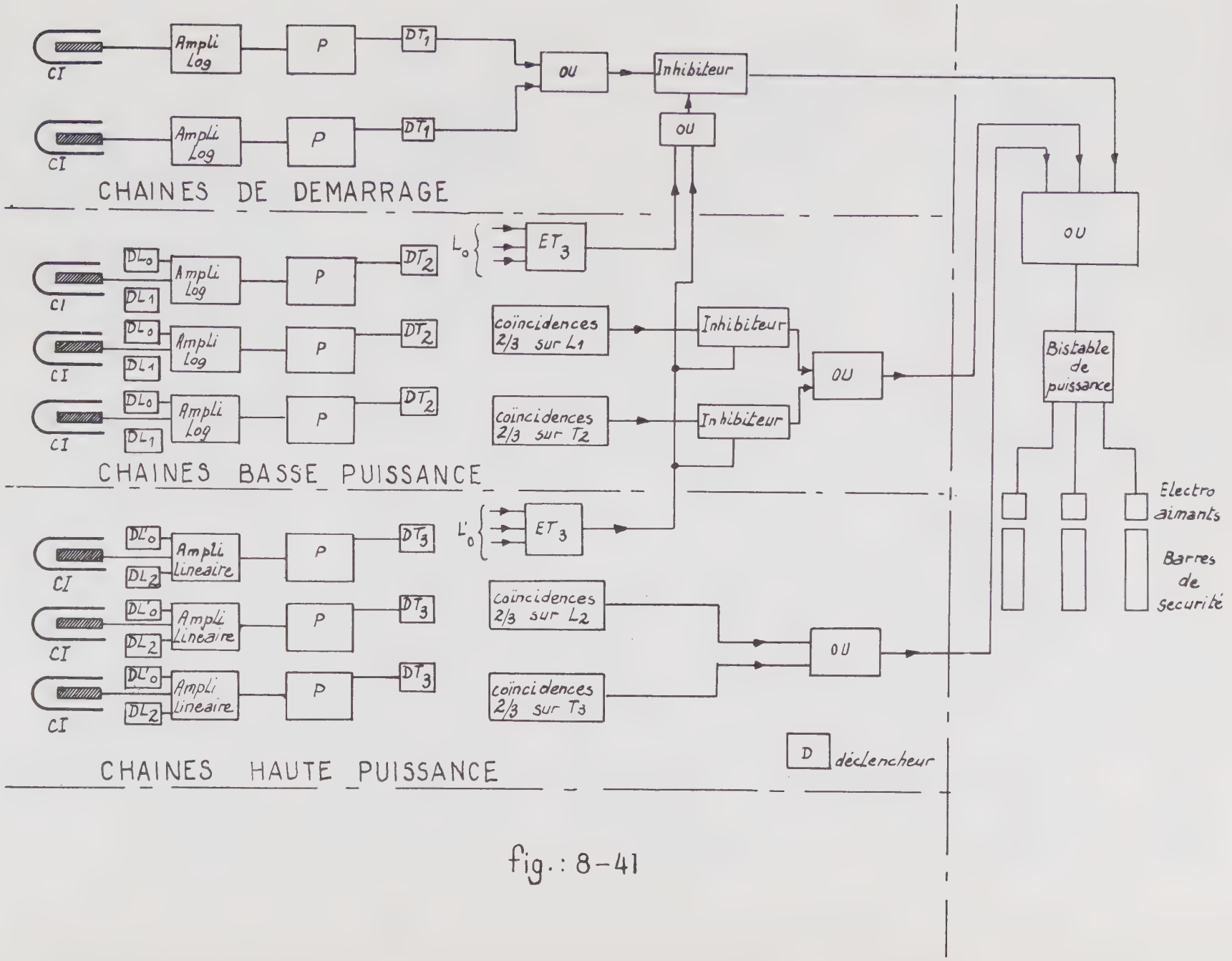

CI
Ampli Log
P
DT1
OU
Inhibiteur
CHAINES DE DEMARRAGE
DL0
DL1
DT2
L0
ET3
coïncidences 2/3 sur L1
coïncidences 2/3 sur T2
OU
Bistable de puissance
Electro aimants
CHAINES BASSE PUISSANCE
DL'0
DL2
Ampli Lineaire
DT3
L'0
coïncidences 2/3 sur L2
coïncidences 2/3 sur T3
Barres de securité
D
déclencheur
CHAINES HAUTE PUISSANCE

fig. : 8-41

est aussi indispensable que ces déclencheurs ne perturbent pas le fonctionnement de l'appareil de mesure.

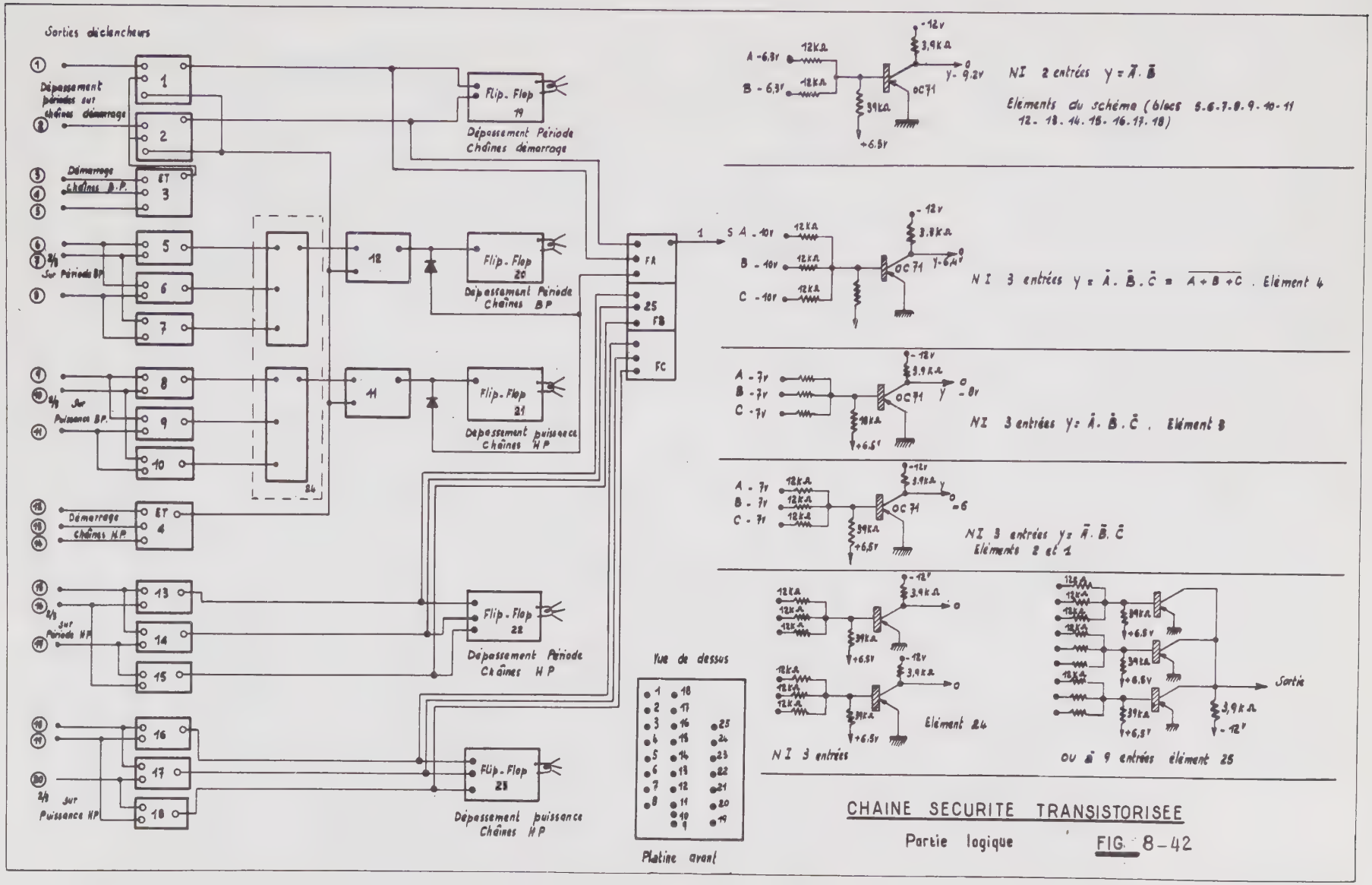
La constitution des déclencheurs est indiquée sur les schémas des figures 8-21 et 8-22 que nous avons décrites, leur fonctionnement étant dérivé de celui du trigger de Schmitt polarisé. Les circuits logiques sont du type NI, constitués de transistors et résistances. Sur la figure 8-42, on a représenté les éléments de base qui constituent les fonctions réalisées.

Les transistors utilisés sont du type PNP OC 71. Dans le cas du NI trois entrées, le transistor représenté est bloqué. Si aucun signal de polarité convenable n'est appliqué ni en A, ni en B, ni en C, le potentiel de sortie du point Y est sensiblement de - 10 V. Si l'on applique en A, B, C un signal de polarité convenable compris entre - 8 V et - 12 V, le potentiel de sortie disparait en s'annulant. En langage binaire on dit que pour un signal 1 à l'entrée, on a un signal 0 à la sortie.

Si l'on utilise qu'une seule entrée du circuit NI, on réalise alors un circuit NON. On peut facilement transformer le circuit NI précédent en circuit ET. Il suffit d'appliquer initialement une polarité $\geqslant$ 0 sur A, B et C comme indiqué de l'ordre de - 10 V, le transistor est débloqué et le potentiel de Y est sensiblement nul.

Pour que le transistor se bloque, il faut qu'à la fois une polarité $>$ 0 soit appliquée sur A, sur B et sur C. On a indiqué sur la figure 8-42, la façon de grouper trois circuits NI pour réaliser un OU à neuf entrées.

Les coïncidences du type 2/3 sont faites à l'aide d'un circuit

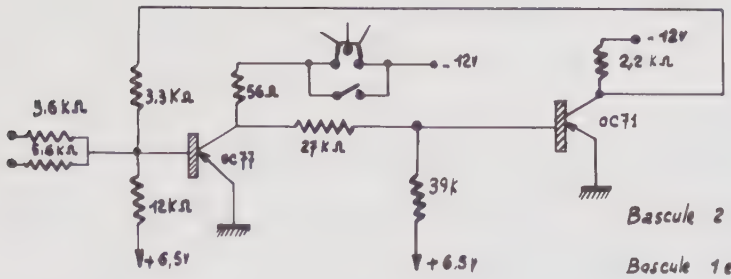

Sorties disjoncteurs
Dépassement périodes sur chaînes démarrage
Démarrage chaînes B.P.
Sur Période BP
Sur Puissance BP
Démarrage chaînes H.P
Sur Période HP
Sur Puissance HP
ET
Flip. Flop 19
Dépassement Période Chaînes démarrage
Flip. Flop 20
Dépassement Période Chaînes BP
Flip. Flop 21
Dépassement puissance Chaînes HP
Flip. Flop 22
Dépassement Période Chaînes HP
Flip. Flop 23
Dépassement puissance Chaînes HP
FA
FB
FC
Vue de dessus
Platine avant
NI 2 entrées y = Ā . B̄
Eléments du schéma (blocs 5.6.7.8.9.10.11 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18)
NI 3 entrées y = Ā . B̄ . C̄ = A + B + C . Elément 4
NI 3 entrées y = Ā . B̄ . C̄ . Elément 8
NI 3 entrées y = Ā . B̄ . C̄ Eléments 2 et 1
Elément 24
NI 3 entrées
ou à 9 entrées élément 25
Sortie
CHAINE SECURITE TRANSISTORISEE
Partie logique
FIG. 8-42

NI à deux entrées. Nous avons indiqué sur la figure 8-42 le schéma logique qui réalise l'automatisme de la sécurité imposée.

Lorsqu'une chute de barres est décidée par le circuit logique, un voyant commandé par une bascule s'allume. Le voyant reste allumé jusqu'au moment où la vigilance est réalisée par l'opérateur à l'aide d'un bouton poussoir, le défaut ayant disparu. Le schéma des bascules utilisées est indiqué sur la figure 8-43. Suivant l'origine des causes de chutes des barres, il est nécessaire d'utiliser des bascules à une entrée, deux ou trois entrées.

Le bistable de puissance est destiné à alimenter les électroaimants supports des barres de sécurité, il fournit en fonctionnement normal une puissance de l'ordre de 70 watts sous une tension de 24 volts avec une intensité de 3 ampères. Le schéma de cet élément est représenté sur la figure 8-44. C'est un amplificateur qui en fonctionnement normal a son entrée toujours bloquée et dont l'étage de sortie comporte un transistor travaillant à saturation. Une intervention manuelle est possible par action sur un bouton de "scram" pour débloquer l'entrée de l'amplificateur, lorsque l'on veut faire chuter les barres de sécurité manuellement. De même, un circuit de réaction avec intervention manuelle par l'intermédiaire d'un interrupteur à poussoir est prévu, pour pouvoir à nouveau alimenter les électroaimants, après coupure d'alimentation de ces derniers en cas de défaut.

Les tensions nécessaires aux déclencheurs, aux circuits logiques et aux signalisations sont des tensions continues - 12 V, + 6,5 V et - 70 V. Ces tensions sont fabriquées à partir du secteur 127 V, 50 Hz. Elles sont régulées par l'intermédiaire d'une régulation classique à transistors pour les tensions - 12 V et + 6,5 V et par un empilement

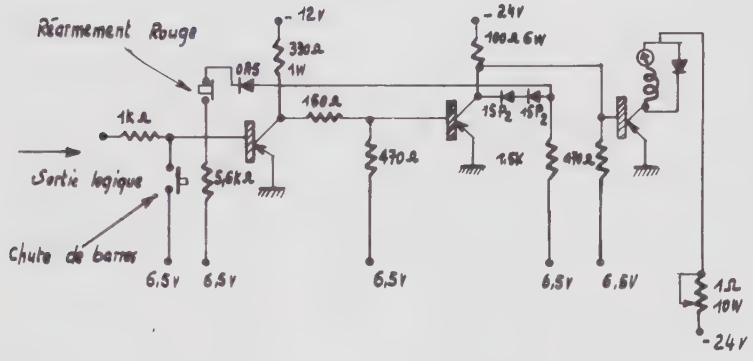


Bascule 2 entrées. Elément 19

Bascule 1 entrée Eléments 20 et 21

Bascule 3 entrées Eléments 22 et 23

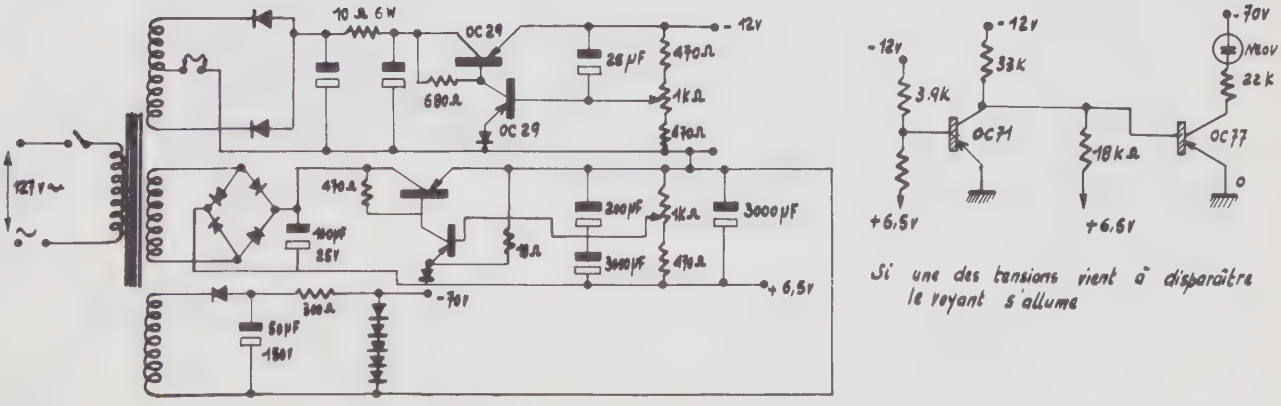
FIG 8-43



En fonctionnement normal l'entrée est toujours bloquée

Elément de sortie. Alimentation. Electro aimant 24 V 3 A

FIG 8-44



Si une des tensions vient à disparaître le voyant s'allume

FIG 8-45

de diodes zeener pour le 70 V.

Nous donnons sur la figure 8-45, le schéma des circuits d'alimentation des tensions continues - 12 V, + 6,5 V et + 70 V.

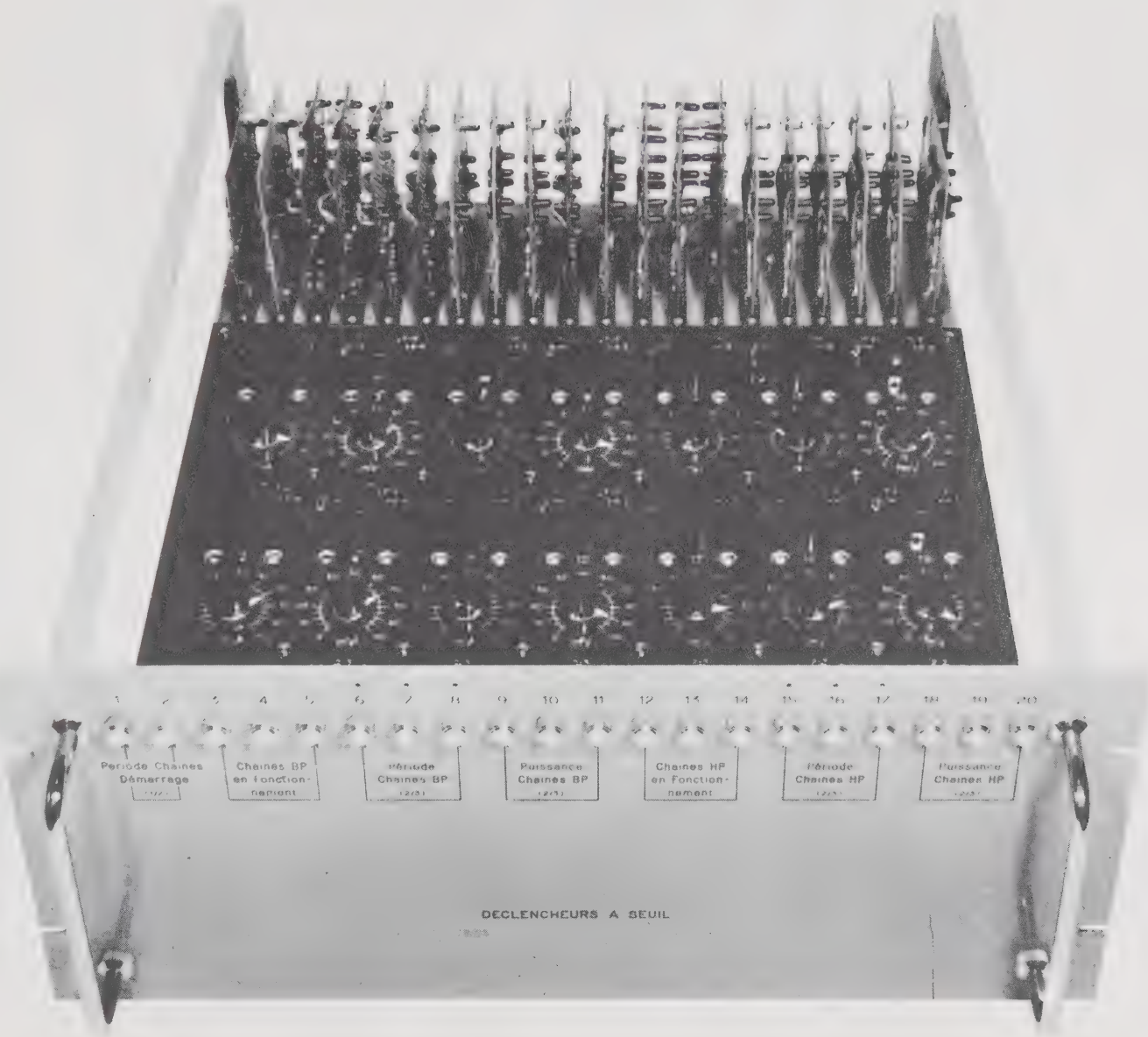
La tension 24 V continue nécessaire à l'alimentation des électroaimants est fournie soit par batterie, soit par le secteur à l'aide d'un pont de diodes.

L'étude des circuits a été conduite de façon à ce qu'il soient le plus possible du type "sûreté de fonctionnement intégrale". En particulier les déclencheurs donnent en permanence, lorsqu'il n'y a pas de dépassement de niveau, un signal de sortie de l'ordre de - 12 V. Ce signal disparait également si le circuit du déclencheur est ouvert, ou autrement dit débranché des appareils de mesure qui le précèdent.

Les circuits logiques et l'élément de sortie sont aussi commandés par disparition de signal.

Les circuits déclencheurs, au nombre de 20, sont réalisés sur cartes enfichables, comme il est indiqué sur la photo de la figure 8-46 L'ensemble des 20 déclencheurs est contenu dans un rack du standard C.E.A. Comme on peut le voir sur la photo de la figure 8-46, l'ensemble des réglages est interne. Seules apparaissent sur la face avant les néons de signalisation.

Les parties logiques, alimentation générale et alimentation d'électroaimants se trouvent dans un autre rack du standard C.E.A. interconnecté au précédent.


Période Chaines Démarrage
Chaines BP en fonctionnement
Période Chaines BP
Puissance Chaines BP
Chaines HP en Fonctionnement
Période Chaines HP
Puissance Chaines HP
DECLENCHEURS A SEUIL

- Fig. 8 - 46 -

Les parties logiques, alimentation générale, alimentation 24 volts, amplificateur de commande, forment des sous-ensembles contenus dans des tiroirs comme on peut le voir sur les photos des figures 8-47 et 8-48.

Les différents éléments : déclencheurs, circuits logiques, etc... ont été réalisés à l'aide de transistors tout venant sans tri préalable. On conçoit aisément, à l'heure actuelle, que pour les circuits logiques, il n'y ait aucune difficulté à obtenir des résultats satisfaisants avec des transistors de série. Les variations de $\pm$ 20 p. 100 des tensions d'alimentation n'affectent pas le fonctionnement de la logique.

Pour les déclencheurs, les performances ont déjà été données. L'ensemble de la chaîne a été testé pendant de nombreux mois, l'élément de puissance débitant en permanence la puissance prévue, c'est-à-dire environ 70 watts.

Le deuxième exemple de chaîne de sécurité concerne une chaîne de sécurité du type magnétique installée sur la pile Peggy.*

A la sortie des amplificateurs des chaînes destinées au contrôle sur deux chaînes à fissions, une chaîne logarithmique à courant avec périodemètre, une chaîne linéaire à courant, et une chaîne linéaire à courant pour rayonnements γ, sont branchées six bistables magnétiques qui basculent pour une certaine valeur du signal de sortie (le seuil de basculement étant d'ailleurs réglable par affichage).

Ces bistables commandent une logique du type magnétique qui actionne un amplificateur de puissance, source d'alimentation des embrayages supports des barres de sécurité et de pilotage.

* Référence [87]

En dehors des six bistables magnétiques qui se trouvent à la sortie des amplificateurs des chaînes de mesures neutroniques, un bistable est directement branché à la sortie d'une chambre à fissions fonctionnant en courant.

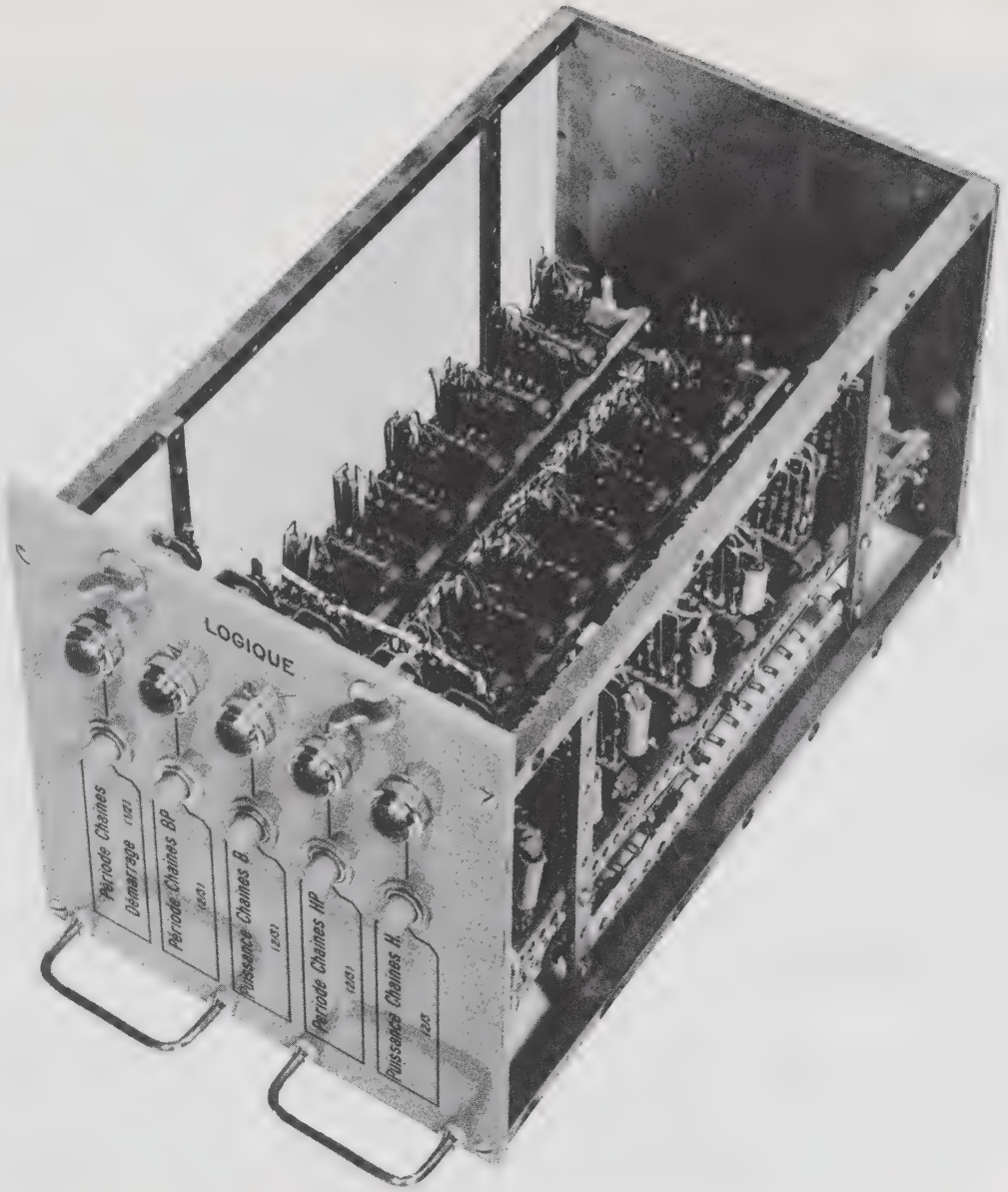
La logique est conçue de façon que, pour tout dépassement de seuil, les embrayages supports des barres de sécurité ou de pilotage ne sont plus alimentés. Le schéma de principe de la chaîne est indiqué figure 8-49.

Les bistables utilisés sont du type Westinghouse, leur sensibilité est de $0,07 . 10^{-6}$ watts. Leur temps de basculement est inférieur à 20 ms pour un signal d'entrée supérieur de 5 p. 100 au seuil de déclenchement. Ils sont alimentés en 122 volts, 50 Hz et fabriquent eux-mêmex leur tension de polarisation.

Ils donnent en permanence un signal et, pour tout dépassement de seuil préréglé sur un enroulement de polarisation, ce signal disparaît. Leur fonctionnement est donc du type "fail safe".

La partie logique réalise la fonction ET à 7 entrées. Si Y est le signal de sortie de cette logique et X_i les différents signaux d'entrée, on a pour fonction $Y = X_1 \ X_2 \ldots\ldots X_6 \ X_7$ (voir figure 8-50).

Mais de plus, chaque sortie de bistable est pourvue d'une mémoire de signalisation destinée à avertir l'opérateur du dépassement de seuil, même momentané. Si l'une des 7 mémoires fonctionne, les embrayages ne sont plus alimentés et l'opérateur doit vigiler le dépassement de seuil pour pouvoir fermer à nouveau la chaîne de sécurité. Il ne peut d'ailleurs le faire que si le signal en dépassement de seuil a disparu.


LOGIQUE
Période Chaines
Démarrage
Période Chaines BP
Puissance Chaines B
Période Chaines HP
Puissance Chaines H.

- Fig. 8 - 47 -

LOGIQUE
ALIMENTATION ELECTRO-AIMANTS
ALIMENTATION 24 V
Secteur
24 V
Alimentation Générale
Marche
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Période Chenes Démarrage
Chenes BP en Fonction nement
Période Chenes BP
Puissance Chenes BP
Chenes HP en Fonction nement
Période Chenes HP
Puissance Chenes HP
DECLENCHEURS A SEUIL

- Fig. 8 - 48 -

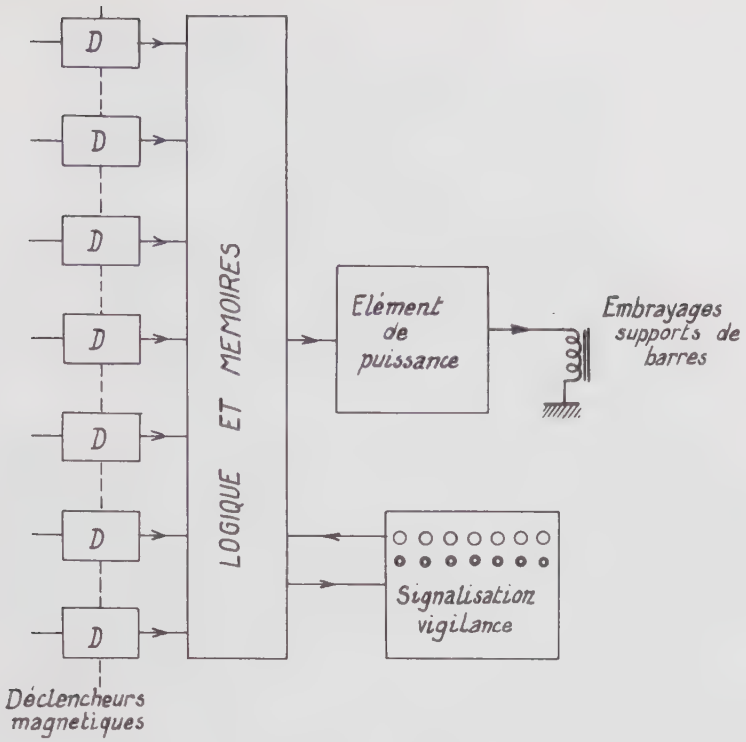


fig. : 8-49

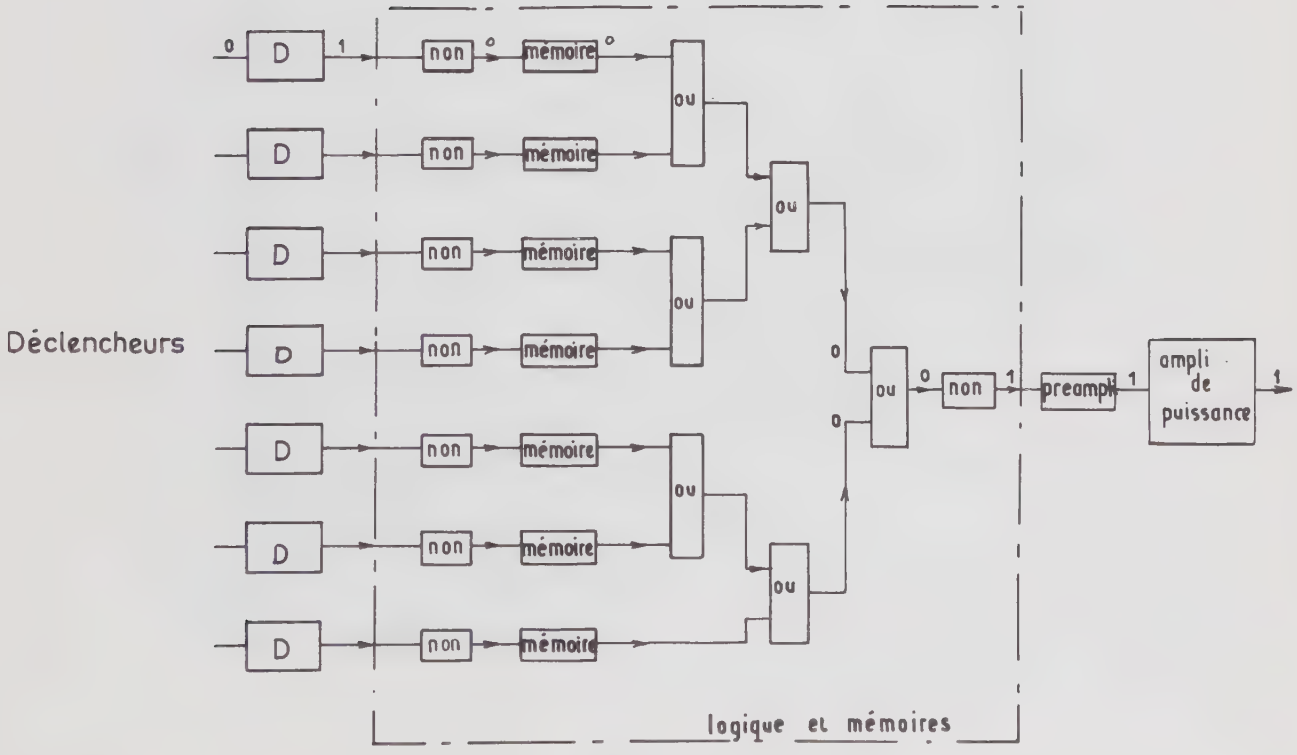


FIG 8-50

Les éléments qui constituent cette logique sont du type CYPACK fabriqués par la Société "Le Matériel Electrique SW".

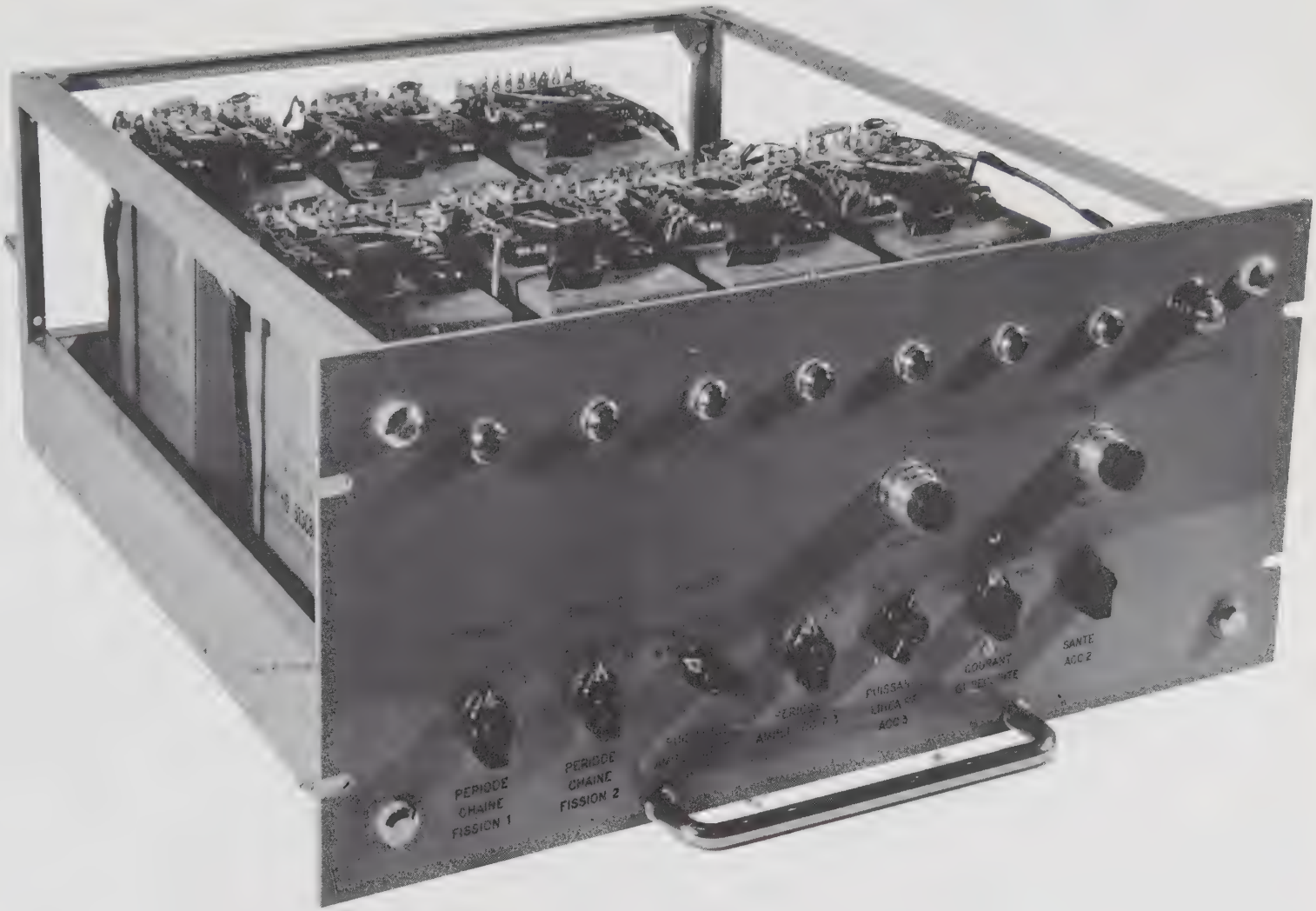
L'élément de puissance est essentiellement constitué par un préamplificateur magnétique CYPAK et un amplificateur magnétique MUTRON de 150 V A 220 volts, suivi d'un transformateur abaisseur à deux enroulements de sortie destinés à fournir le 24 volts continu et le 90 volts continu après redressement deux alternances.

L'ensemble des bistables magnétiques se trouve dans un rack 5 unités du standard C.E.A. mis à l'arrière du tableau de contrôle avec seulement accès aux réglages des différents seuils (photo de la figure 8-51).

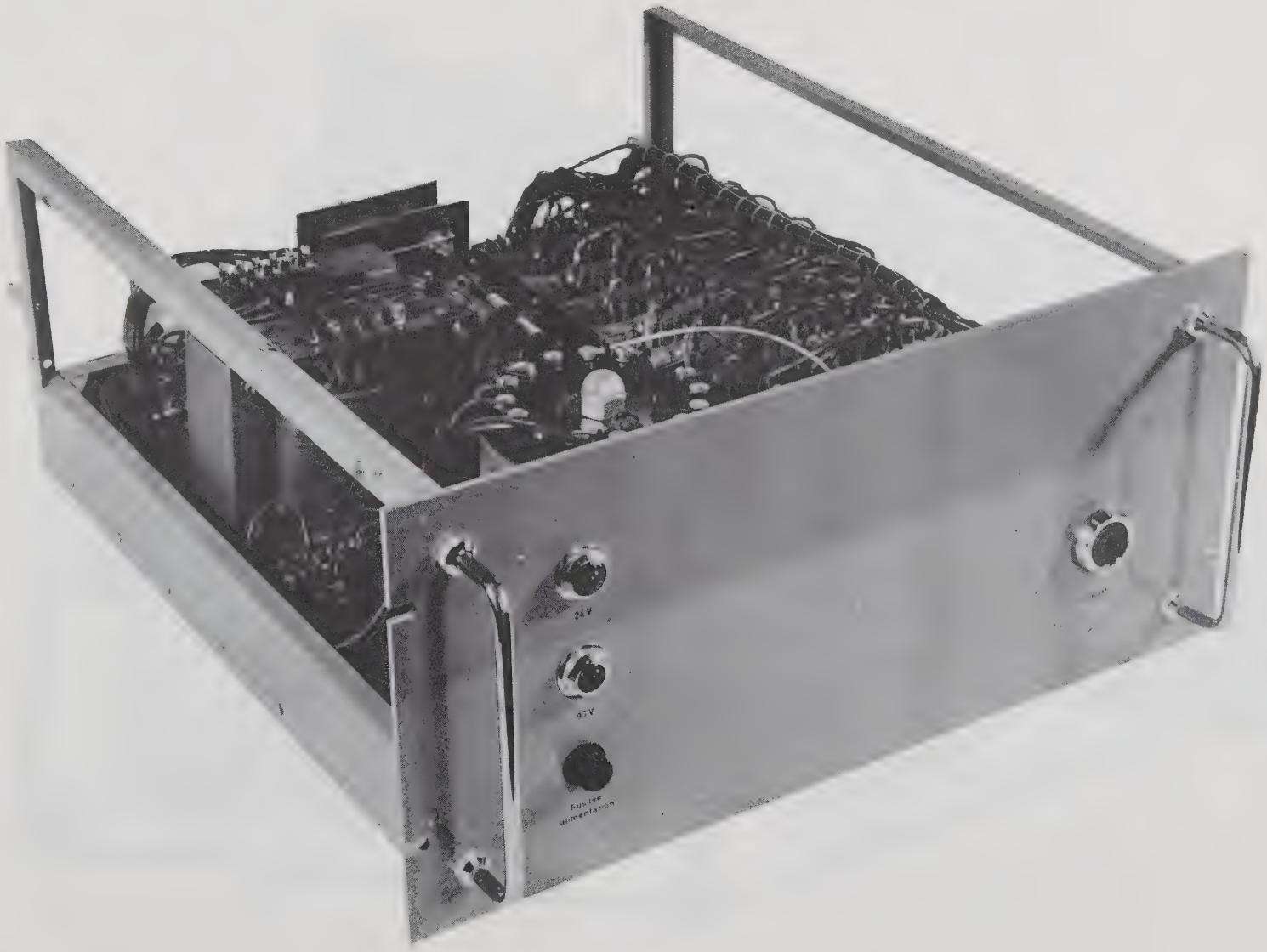
La partie logique et puissance se trouve dans un rack 5 unités du standard C.E.A. industriel (photo de la figure 8-52). Les voyants des mémoires avec boutons d'effacement se trouvent sur le pupitre de contrôle.

Pendant deux mois cette chaîne a été testée d'une façon continue au laboratoire avec un appareil de tests automatiques du type magnétique. Toutes les dix minutes un dépassement de seuil était simulé et une vérification du bon fonctionnement de la chaîne de sécurité était faite. Simultanément, les fonctionnements intempestifs entre tests étaient enregistrés à l'aide de mémoires.

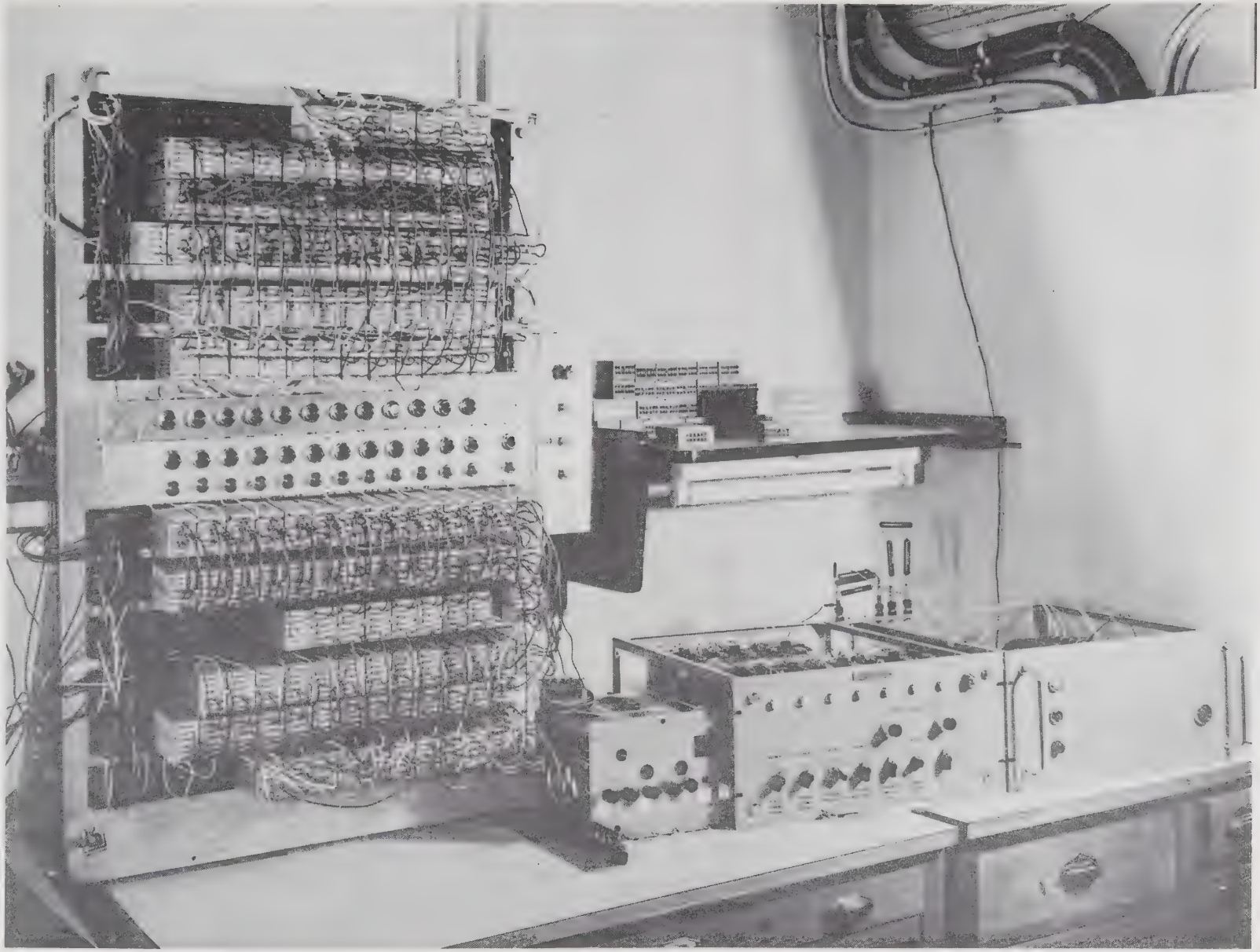
La chaîne de sécurité en cours de test est représentée sur la photo de la figure 8-53. Actuellement cette chaîne est en service continu sur la pile Peggy, depuis plusieurs mois.


PERIODE
CHAINE
FISSION 1
PERIODE
CHAINE
FISSION 2
SANTE
ACC 2

- Fig. 8 - 51 -



- Fig. 8 - 52 -



- Fig. 8 - 53 -

8.9. L'évolution des chaînes de sécurité sur les calculateurs.

L'évolution de ces chaînes se fera sans doute avec celle des piles de puissance et des piles à haut flux. Ces chaînes auront sans doute tendance à se transformer en calculateur de sécurité qui recevra un certain nombre d'informations de détecteurs (flux, débit, température, pression, niveau) et qui calculera à tout instant la marge de sécurité de fonctionnement de la pile par calculs mathématiques (analogique ou digital). Lorsque la marge de sécurité sera trop faible, le calculateur élaborera lui-même les ordres entraînant certaines actions correctrices. Ce calculateur permettra sans doute de faire marcher l'installation d'une façon beaucoup plus sûre et d'éviter les arrêts de fonctionnement inutiles.

Pour la sécurité des piles atomiques, certains auteurs pensent que le développement de ce calculateur se fera en deux étapes. Dans une première étape, le calculateur ne donnera à l'opérateur que des indications de marge de sécurité, en lui laissant l'initiative des ordres d'actions correctrices. Dans une deuxième étape, le calculateur élaborerait lui-même ces actions correctrices. *

Ce type de calculateur commence d'ailleurs a être installé sur les installations classiques de production d'énergie telles que les centrales thermiques modernes par exemple.

Il n'est possible de concevoir à l'heure actuelle de pareils calculateurs que parce que l'on dispose d'éléments logiques du type statique, car ils permettent d'augmenter considérablement la vitesse et la sûreté du calcul. On peut aussi citer par exemple, tout l'intérêt qu'il y aurait à disposer d'un calculateur de réactivité, qui donnerait

* Référence [88]

à tout instant la valeur de cette grandeur, qui est fondamentale comme on le sait pour la sécurité de fonctionnement des piles. Un tel calculateur pourrait par exemple supprimer la nécessité de mettre des sources importantes dans le coeur des piles de puissance pour augmenter la sécurité de fonctionnement. D'ailleurs ce calculateur pourrait à la fois être utilisé sur les piles de puissance et sur les piles expérimentales à bas flux. *

Enfin, rappelons l'importance du point de vue sécurité de fonctionnement du calcul à tout instant de l'empoisonnement xénon et la recherche d'un programme d'arrêt le plus rapide, qui permettrait de pouvoir redémarrer la pile après arrêt, à n'importe quel moment, compte-tenu de sa réactivité disponible. On sait en effet que pour les piles à haut flux après arrêt brutal de fonctionnement lié par exemple à une chute des barres de sécurité, l'empoisonnement xénon croît pour atteindre un maximum au bout de quelques heures. Il est toujours difficile de disposer d'un excès de réactivité permettant de redémarrer la pile à n'importe quel moment après arrêt. D'ailleurs cet excès de réactivité coûte cher. Ce problème de redémarrage, qui devient un problème d'optimisation, nécessite de disposer de calculateurs numériques rapides équipés de mémoires importantes. Ces calculateurs ne peuvent être, bien entendu, que du type à circuits logiques statiques.

Du côté des mesures thermodynamiques un effort important reste à faire dans l'immédiat pour les chaînes de sécurité. Les systèmes de coïncidences du type 2/3 ou autres dont nous avons parlé ont surtout été installés à la suite des mesures neutroniques (c'est-à-dire sécurité de niveau de flux neutronique). Hors, il apparaît surtout pour les piles de puissance, qu'un des accidents les plus graves est celui du défaut de réfrigération, manque de débit, élévation de température du combus-

* Référence [89]

tible, obstruction d'un canal. De ce côté là, il faut avouer que du point de vue mesure, l'effort fait est bien inférieur, et de loin, à celui des flux neutroniques. Il est vraisemblable que, pour les piles de puissance, les sécurités thermodynamiques deviendront de plus en plus importantes et primeront même sur les sécurités neutroniques pour les actions correctrices ou les ordres d'arrêts rapides.

Chapitre IX

LES DISPOSITIFS DE SECURITES RAPIDES POUR BAS NIVEAUX DE FLUX NEUTRONIQUE.

Dans beaucoup de piles atomiques expérimentales, le flux neutronique est contrôlé à bas niveau, par des chambres à fissions ou par des compteurs à BF^3 utilisés en régime impulsionnel.

On a vu que la gamme d'utilisation de ces détecteurs est relativement réduite puisque, au-dessous d'une dizaine de coups par seconde, les fluctuations statistiques sont telles que les mesures instantanées ont peu de signification ; au-dessus de 10^5 coups/s, detecteurs et électronique sont voisins de la saturation pour laquelle le fonctionnement est très incertain.

Pour actionner des alarmes à partir de telles chaînes, on utilise généralement des intégrateurs linéaires ou logarithmiques dont la tension de sortie actionne un circuit à seuil.

Ces appareils sont efficaces quand les dépassements de seuils sont produits par des divergences dont la période est supérieure à une seconde ou une fraction de seconde. En cas de divergence accidentelle de période beaucoup plus courte, la gamme d'utilisation de ces détecteurs peut se trouver rapidement franchie et alors les circuits actionnant les sécurités ne peuvent remplir leur rôle, d'une part à cause de leurs constantes de temps importantes et d'autre part à cause de la saturation qui risque de paralyser détecteurs et circuits de mise en forme.

Pour pallier ces inconvénients, on peut tout d'abord utiliser des détecteurs plus sensibles, par exemple des scintillateurs sensibles au rayonnement γ lié aux fissions.*

Le principe de fonctionnement de l'appareil étudié est indiqué sur la figure 9-1. Les rayonnements γ produisent des scintillations dans le cristal NaI vu par un photomultiplicateur. A la sortie du photomultiplicateur se trouve un circuit intégrateur de faible constante de temps. Le photomultiplicateur fonctionne donc en générateur de courant, ce dernier est alors amplifié à l'aide d'un amplificateur à courant continu à contre réaction, lui-même suivi d'un déclencheur à seuil destiné à actionner une alarme.

Les tensions des électrodes focalisatrice et déflectrice sont ajustées pour un courant d'obscurité minimum et un gain maximum.

L'amplificateur dont le schéma est indiqué sur la figure 9-2 est un montage utilisant des transistors au silicium BCZ II avec collecteur commun.** L'impédance d'entrée est de l'ordre de 2 MΩ , le gain de 400 pour une bande passante approximative de 100 kHz. En contre réactionnant, il est nécessaire de réduire cette bande passante par une capacité en sortie de 0,47 μF et une capacité de 0,5 μF à l'entrée pour éviter les oscillations. La dérive du signal de sortie ne dépasse pas 1 mV / °C.

Le schéma du déclencheur est indiqué sur la figure 9-3 ; ce n'est autre qu'un amplificateur saturé avec réaction de façon à avoir une caractéristique brusque et une hystérésis limitée à quelques centaines de millivolts.

* Référence [90] ** Référence [91]

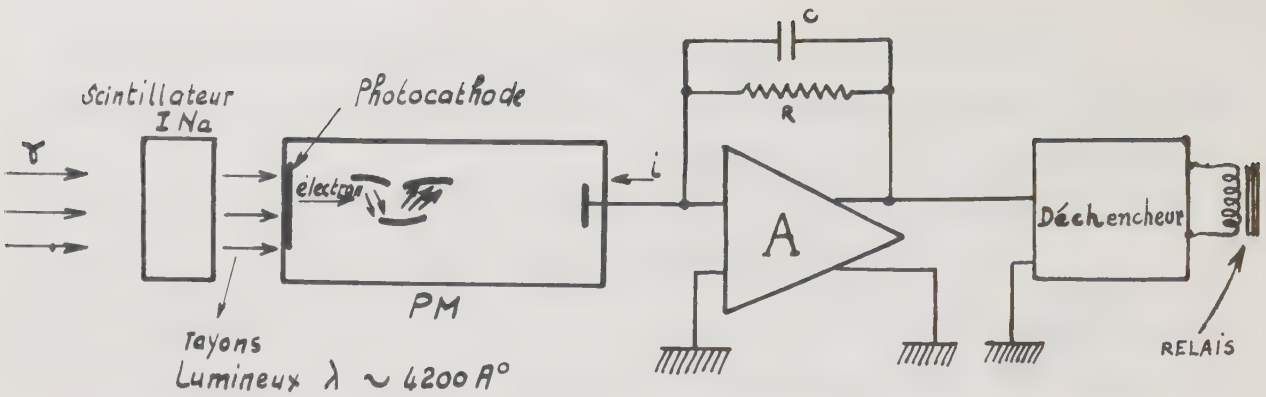


FIG 9-1

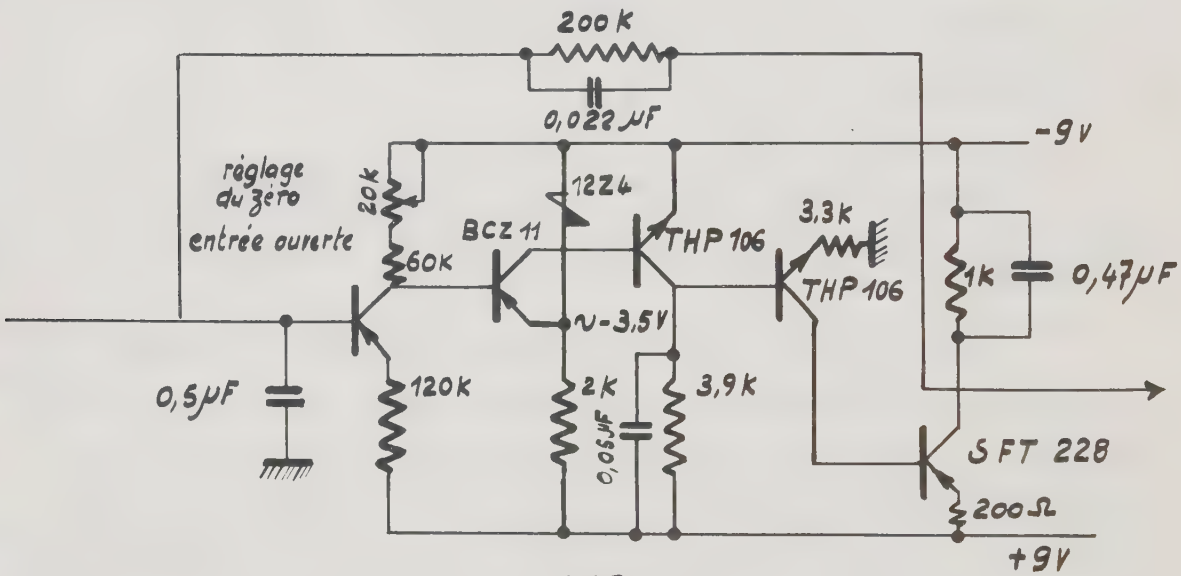


FIG 9-2

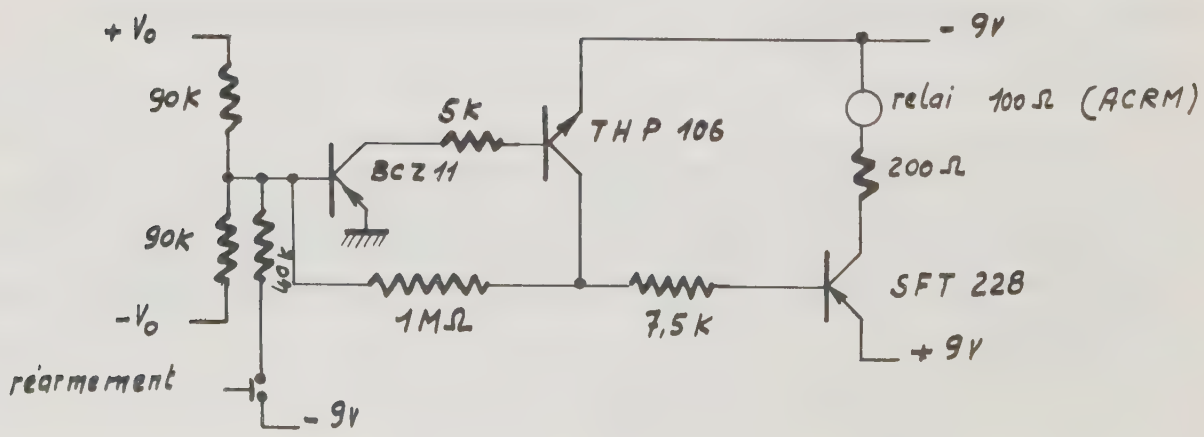


FIG 9-3

La constante de temps de l'ensemble compte tenu de la capacité d'intégration est limitée à 5 ms.

Avec un photomultiplicateur de gain 10^8, des mesures ont été faites à une distance de 2 m d'une source radioactive γ de 0,5 mR / h et les essais de bon fonctionnement ont été concluants.

Souvent, dans les mesures de flux à bas niveau, aussi bien à l'aide de compteurs que de chambres d'ionisation, on peut asservir la puissance entre deux niveaux (1 niveau minimum et un niveau maximum). Ces deux niveaux ou butées étant déplaçables manuellement ou automatiquement pendant l'évolution du flux neutronique, la vitesse de cette évolution étant contrôlée par celle du déplacement des deux butées.

La figure 9-4 représente la photographie d'un amplificateur à courant continu pour mesure de courant faible équipé de deux butées mini-maxi réalisées à l'aide de bistables magnétiques. On peut voir que sur la face avant ne subsiste que le commutateur de déplacement des butées, tous les autres réglages étant internes à l'appareil.

Ces appareils sont surtout destinés aux piles atomiques de très faible puissance du type empilements critiques, ils limitent comme on l'a dit la vitesse d'évolution de la puissance et obligent d'autre part les opérateurs à suivre cette évolution.

Chapitre X

LES DISPOSITIFS DE SECURITE DU TYPE "FUSIBLE".

Les fusibles sont des dispositifs destinés à assurer la sécurité de la pile, indépendamment des chaînes de sécurité dont nous venons de parler. Ces fusibles ne doivent fonctionner qu'une ou deux fois au cours de la vie de la pile. Ils réalisent eux-mêmes leur mise en oeuvre à l'intérieur du coeur, et leur fonctionnement est indépendant de toute source d'énergie externe. On leur demande de protéger la pile contre les risques suivants : flux neutronique trop élevé ou température trop élevée lorsque les autres dispositifs de sécurité sont en défaut. Par exemple, à la suite d'un incident mécanique grave qui empêcherait l'introduction des bornes de sécurité dans le coeur, les fusibles doivent stopper la réaction en chaîne. *

On leur demande le plus souvent :

a) fonctionnement extrêment sûr

b) conception aussi simple que possible

c) autonomie complète (en particulier aucun circuit électrique)

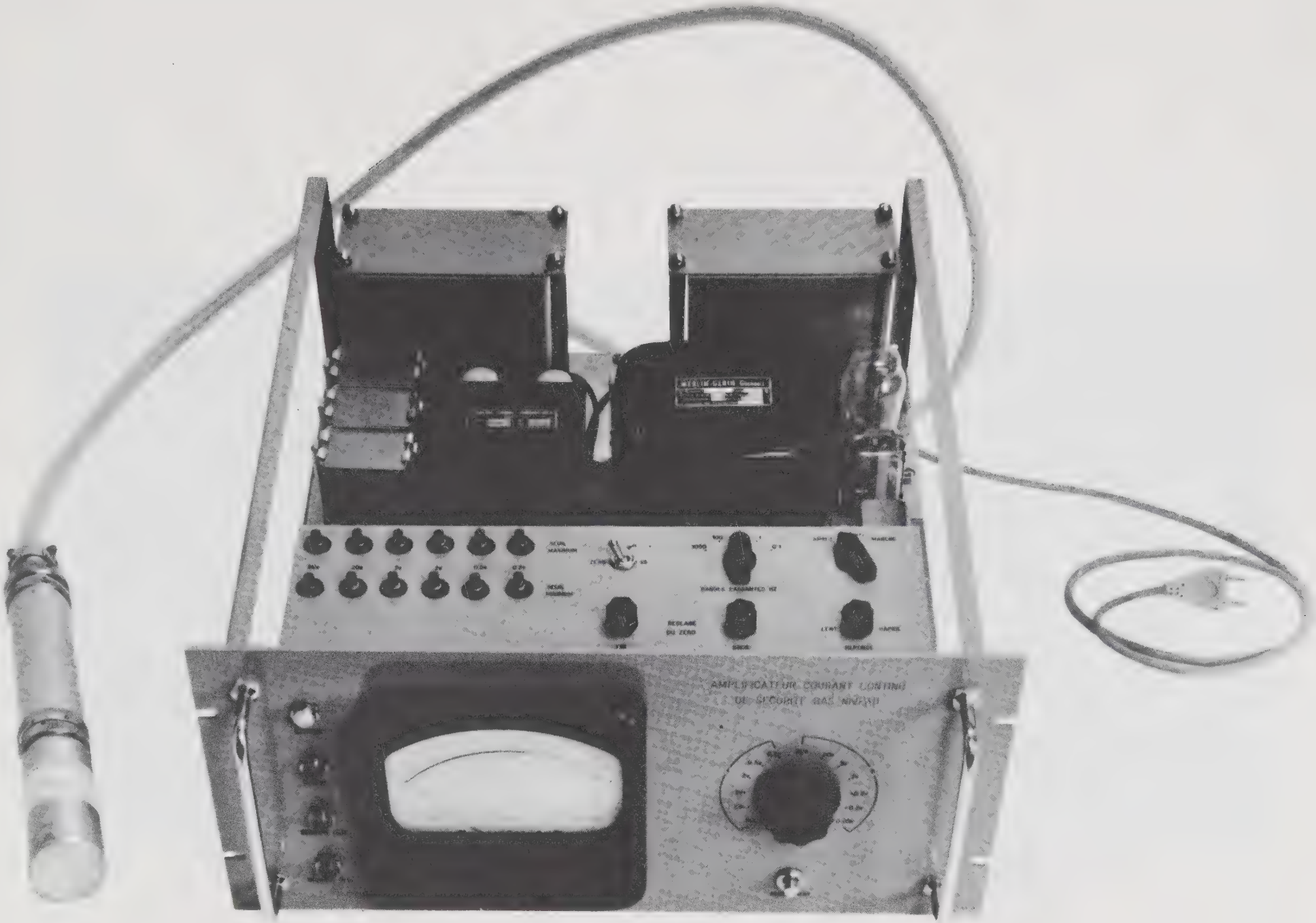
d) fonctionnement aussi rapide que celui des barres de sécurité

e) insensibilité aux variations lentes de puissance

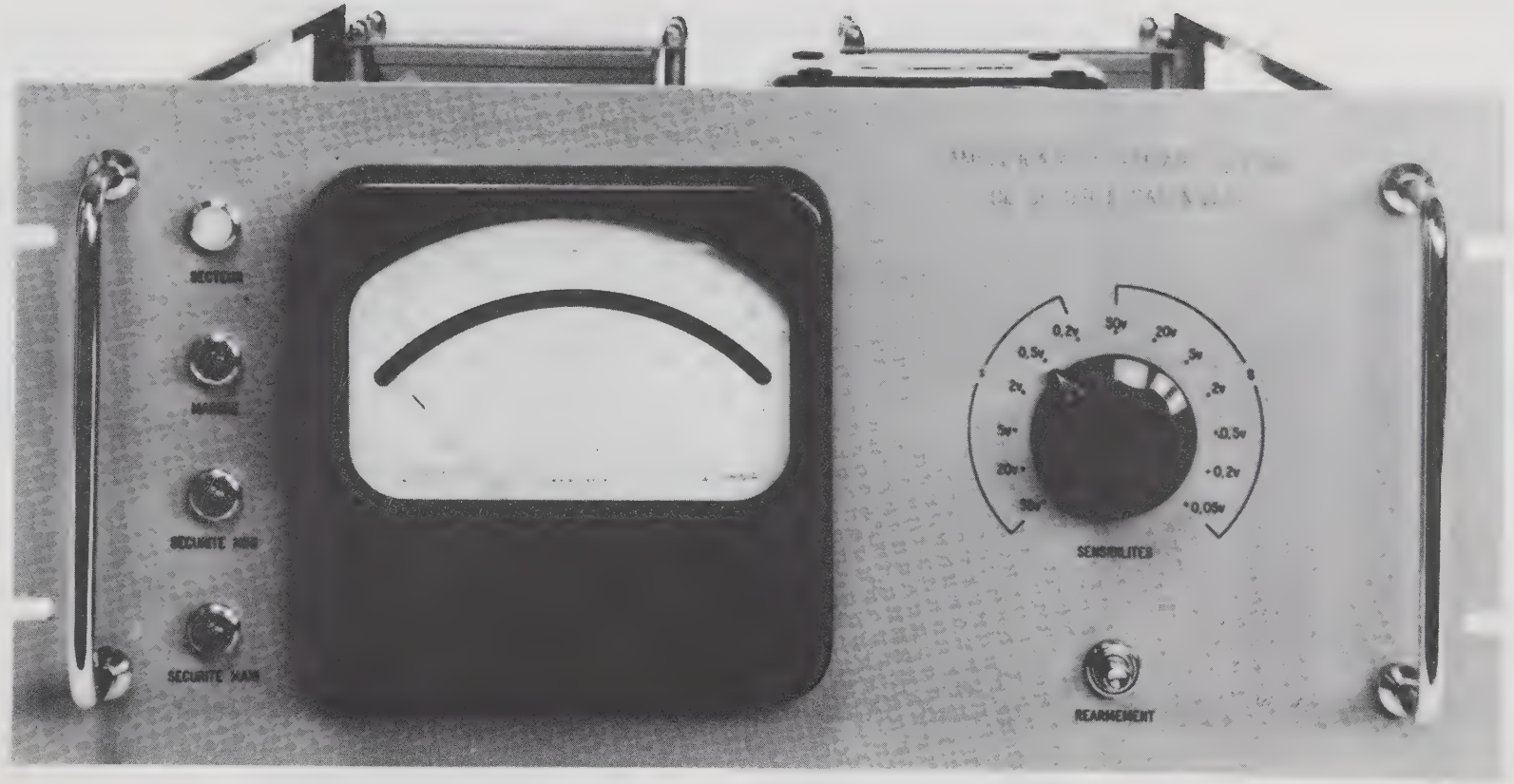
f) insensibilité à un accroissement de puissance de l'ordre de 30 p. 100 de la puissance nominale

g) stabilité de fonctionnement dans le temps (c'est-à-dire fonctionnement possible, même après un séjour de plusieurs mois dans le coeur)

* Référence [92]



- Fig. 9 - 4 a -


SECTEUR
SECURITE MAX
SECURITE MIN
0,2v
0,5v
2v
5v
20v
50v
,20v
,5v
,2v
<0,5v
<0,2v
<0,05v
SENSIBILITES
REARMEMENT

- Fig. 9 - 4 b -

h) perte de réactivité en fonctionnement normal aussi faible que possible

i) efficacité suffisante pour toutes les excursions prévisibles.

Le fusible comprend en général trois parties :

1°- Un détecteur de neutrons ou, éventuellement, de température.

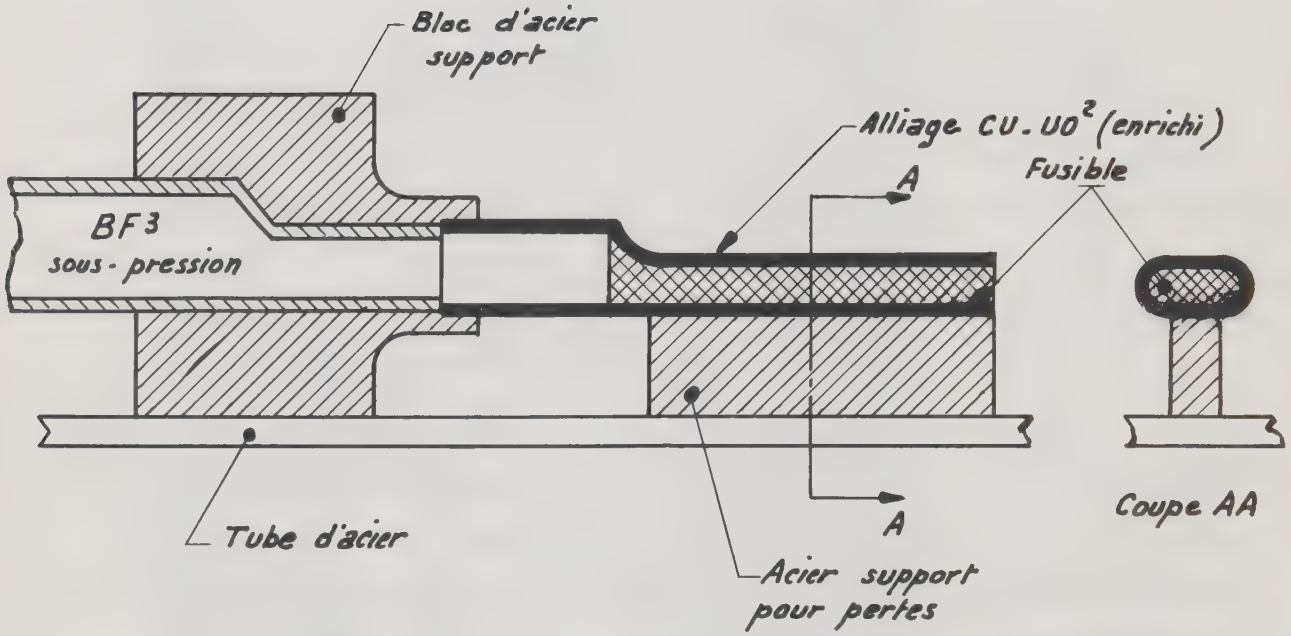
2°- Un absorbeur de neutrons : celui-ci est placé de telle sorte qu'il ne contribue pas à une diminution notable de la réactivité disponible en fonctionnement normal. En général cet absorbeur est un corps dont la section efficace est très grande pour les neutrons thermiques. Il peut être employé sous des formes diverses : gaz, poudre, liquide, solide.

3°- Un récepteur de l'absorbeur : le plus souvent il se présente sous la forme d'un tube dont la partie inférieure plonge dans le coeur de la pile et est vide en fonctionnement normal. Cette partie se remplit presque instantanément d'absorbant lorsque le détecteur a joué son rôle.

Le détecteur de neutrons est la partie la plus délicate. Les solutions retenues sont en général les suivantes : disque fusible, chapeau fusible, diaphragme couplé. Le fusible fonctionnant sous l'effet des calories apportées par les fissions qui se produisent dans un matériau fissile. *

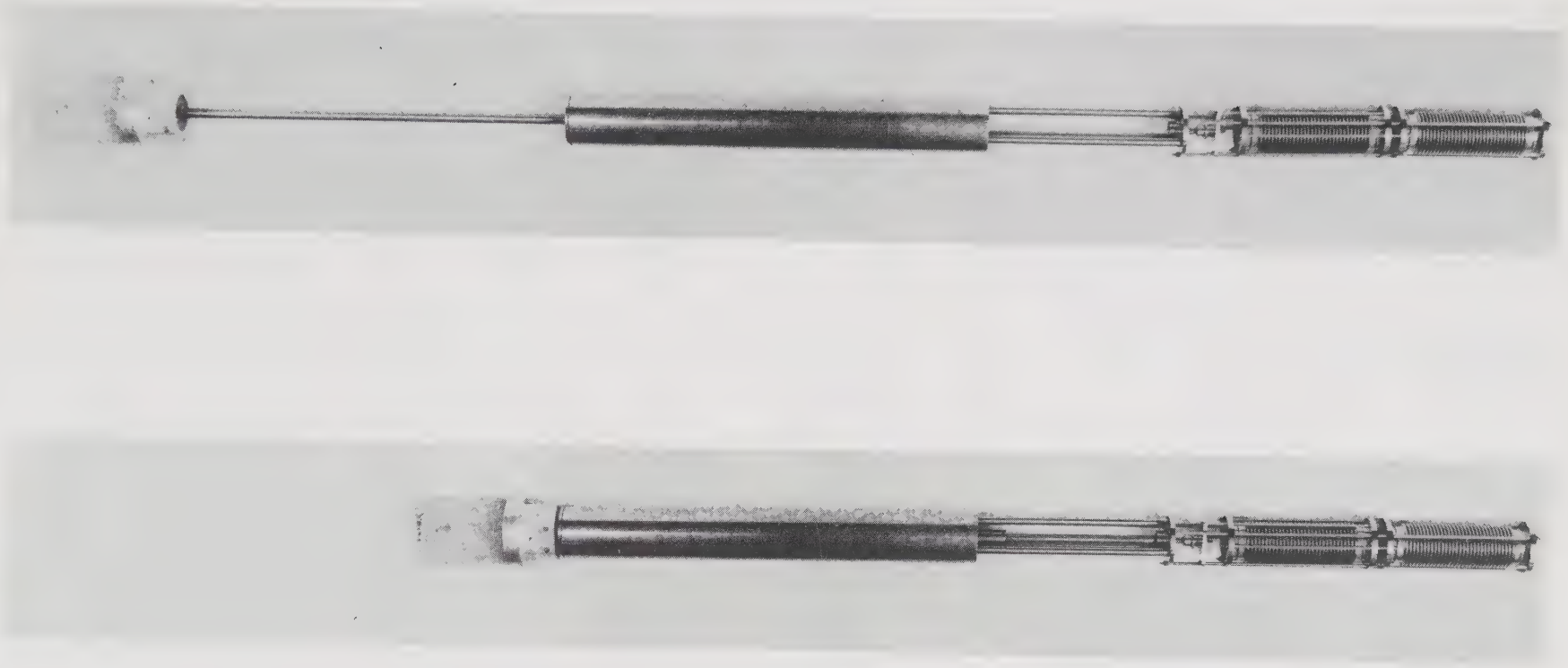
Sur la figure 10-1 a été indiqué le fusible mis au point par l'Atomics International.

* Référence [93]



FUSIBLE DE L'ATOMICS INTERNATIONAL

fig.: 10 - 1



- Fig. 10 - 2 -

La photo, figure 10-2,représente un fusible où la dilatation différentielle de deux soufflets est utilisée pour réaliser un détecteur sensible uniquement au flux neutronique. La solution retenue actuellement est de remplir un soufflet de gaz inerte et l'autre de gaz fissile ou de gaz inerte en présence de matériau fissile. *

Si l'on ne veut pas polluer l'ensemble du coeur pile, l'effet du poison doit être localisé. Il faut alors disposer d'un certain nombre de barres fusibles pour avoir une efficacité suffisante surtout pour les piles volumineuses telles que celles à graphite et uranium naturel.

Disons un mot des inconvénients de ces fusibles :

a) leur constante de temps est élevée, de l'ordre au moins de 10 secondes à cause de la capacité thermique de leurs constituants

b) on n'a pas une certitude absolue d'un fonctionnement correct après un taux d'irradiation élevé

c) enfin la présence de barres fusibles dans le coeur pile est défavorable au bilan de réactivité.

Ces raisons font que ces éléments fusibles ou barres fusibles, en cours de développement dans différents laboratoires, ne sont pas encore installés couramment sur les piles en fonctionnement. On envisage surtout d'utiliser ces barres fusibles pendant certaines périodes de fonctionnement de la pile et pour certaines conditions d'exploitation, telles que les opérations de chargement et de déchargement ou, par exemple, les moyens habituels d'arrêter la pile ne sont pas réalisables (mécanismes de barres déplacés par exemple).

* Référence [94]

C O N C L U S I O N

La sécurité de fonctionnement des piles atomiques est certainement l'un des problèmes fondamentaux au développement de l'énergie nucléaire et les études de sécurité occupent de plus en plus une part importante dans les projets.

On a d'abord rappelé les risques encourus pendant le fonctionnement des piles atomiques en régime d'accident, on a indiqué les principaux accidents connus qui ce sont produits depuis le début de l'air atomique, accidents pour lesquels une publication a été faite.

On a essayé de montrer l'importance des sécurités intrinsèques des piles atomiques coefficients de température négatifs en particulier et la nécessité du développement de dispositifs de sécurité robustes et de fonctionnement très sur.

On a montré l'influence desvariations de réactivité sur les évolutions de puissance en régime d'accident. Pour cela on a donné quelques résultats de calculs effectués sur machines électroniques et on a développé un certain nombre de méthodes qui permettent de faire certains calculs approchés suffisants pour les études de sécurité. Ces études d'accidents permettent d'ailleurs de déterminer les performances des appareils de mesures neutroniques ou thermodynamiques utilisés dans les chaînes de sécurité. L'influence du retard dans le fonctionnement des sécurités sur les conséquences de l'accident lié à une libération excessive de réactivité a été développé.

On a insisté sur les deux types d'accidents les plus probables susceptibles de se produire pendant la vie de la pile : l'accident de démarrage et l'accident de réfrigération.

Pour l'accident de démarrage, on a montré le compromis qu'il y avait à faire entre la vitesse de libération de réactivité et la vitesse de réponse de la sécurité période pour les piles de faibles puissances

.../...

et entre la vitesse de libération de réactivité et la vitesse d'empoisonnement Xénon pour les piles à haut flux .

On a rappelé l'intérêt de l'utilisation d'éléments statiques dans les chaînes de sécurité et du développement de l'automatisme dans le contrôle des piles atomiques.

La mise au point d'un amplificateur statique de sécurité du type magnétique a été faite. LA description de cet appareil a été donnée ainsi que celle d'un limiteur d'évolution de puissance du type digital, développé au laboratoire et d'un amplificateur à courant continu à chopper Nous avons mis au point deux ensembles de chaînes de sécurité du type statique : une du type magnétique en cours d'exploitation sur la pile PEGGY, une du type semi-conducteur.

Nous avons rappelé le problème du compromis à faire à bas niveau de flux neutronique entre la vitesse des dispositifs de sécurité et les fluctuations statistiques. Nous avons donné un exemple d'appareil très sensible étudié dans ce but au laboratoire et utilisant un ensemble photomultiplicateur cristal sensible au rayonnement γ.

Nous avons insisté sur l'intérêt de l'utilisation de fusibles comme dispositifs de sécurité robuste et nous avons donné un exemple de détecteur en cours de mise au point au laboratoire .

Manuscrit reçu le 5 juin 1962.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] - SIDDALL E.
Statistical analysis of reactor safety standards.
Nucleonics, vol. 12, n° 2, 64-69.

[2] - HURWITZ H.
Safeguard considerations for nuclear power plants.
Nucleonics, vol. 12, n° 3, 57-59.

[3] - NICHOLLS C. M.
The magnitude of possible accidents with exponential experiments subcritical assemblies and zero energy reactors. E. A. E. S. Symposium on safety, control and instrumentation of zero energy and subcritical assemblies.

[4] - COCKROFF J.
Second international conference on the peaceful uses of atomic energy.
Nature, 1959.

[5] - Reactor safety conference.
October 31, 1957, TID 7549, Part I.

[6] - BRITLAN R. O.
Some problems in the safety of fast reactors.
ANL. 5577.

[7] - ABLITT J. F.
Survey of reactor accidents.
E. A. E. S. Symposium on safety, control and instrumentation of zero energy and sub-critical assemblies.

[8] - Cours du Génie Atomique.
I. N. S. T. N., édition 1956.

[9] - POPOVIC D. D.
The bare critical assembly of natural uranium and heavy water.
Institute of Nuclear Sciences "Boris Kidric". Belgrade.
Rapport P. 491. Conférence Internationale de Genève, 1958.

[10] - WEILL J. et FURET J.
Contrôle, sécurité, manipulation de l'eau lourde, exploitation de la pile de puissance nulle pendant les expériences du joint dosimetry Experiment.
Rapport C. E. A. 2005.

[11] - Accident at Windscale n° 1 Pile on october 10, 1957.
Report of the Committee of Inquiry.
Nucleonics, vol. 15, n° 12, p. 43-89-90-91-92.

[12] - Voir Rapports de sûreté établis pour les différentes piles du C. E. A.

[13] - BUSSAC J.
Principes de Contrôle.
Cours du Génie Atomique I. N. S. T. N., vol. 2, édit. 1959-1960.

[14] - FURET J.
Sécurité dans le contrôle des piles atomiques.
Conférence I.N.S.T.N. 1960, Rapport DE-1386 / SAER / 921.

[15] - Etude de l'accident de rupture du circuit d'eau dans la pile EL3.
Rapport D.E.P.-G.P.E./61 - 1187 / 052 -1.

[16] - Mc CULLOUGH C.R., MILLS M. et TELLER E.
La sécurité des piles nucléaires.
Rapport P 853. Conférence Internationale de Genève, 1955.

[17] - WALLACH S.
Solutions of the pile kinetic equations when the reactivity is a linear function of the time WAPD-13 (1950).

[18] - HURWITZ H.
Approximate analysis of reactor startup incidents.
Nuclear Science and Engineering, 1959, 6, 11 - 17.

[19] - STRATTON W.R. and COLVIN T.H.
Analysis of excursions in simple systems.
LASL N-2, 1957, 597.

[20] - CHAIGNE et CHAZAL
Etude analogique de cinétique en régime sous-critique.
Rapport CPLA - 2, 19.

[21] - BISCHOFF N. et CHAZAL G.
Etude analogique d'évolutions de la puissance dans Proserpine.
1395 / SAER / 924 - CPLA - 2 - 21.

[22] - WILKINS J. E.
The behaviour of a reactor at prompt critical when the reactivity is a linear function of time.
Nuclear Science and Engineering, 1959, 5, 207-214.

[23] - RAIEVSKI V.
Effets statiques du xénon, du samarium, de la température et de la pression.

[24] - DEAT M.
Reacteur à haut flux de Vinca. Etude du comportement du réacteur pour différents incidents.
Rapport intérieur de C. E. N., Saclay.

[25] - BIANCHI G. et DEAT M.
Compte-rendu d'une étude relative à une montée d'eau lourde dans EL 3.
Rapport 1195 / DE/ 048.

[26] - WEILL J. et DONVEZ G.
Physique du contrôle des réacteurs. Equations cinétiques des réacteurs nucléaires.
Génie Atomique, XV, parag. XV - 4 - 2.

[27] - Mc PHEE J.
Approximate solutions of the reactor kinetic equations for ramp imputs.
Nuclear Science and Engineering, 1960, 7, 33-43.

[28] - COHEN E. R.
A note of the shape of the power transient following a step input of reactivite. NAA-SR-MEMO 5550.

[29] - RAIEVSKI J.
Rapport n° 185 du Service de la Physique Mathématique.

[30] - WEILL J. et BRAFFORT P.
Le problème de la vitesse des barres de contrôle dans un réacteur nucléaire.
Revue Automatisme. Novembre 1958.

[31] - FURET J. et WEILL J.
La sécurité des piles.
Génie Atomique, chapitre XX, parag. XX - 4.

[32] - RODEBACK G. W.
Approximate solution of the reactor kinetic-equations for one group of delayed neutrons.
NAA-S-R-MEMO - 1854.

[33] - HURWITZ H.
Approximative analysis of reactor start-up incidents.
Nuclear Science and Engineering, 1959, 6, 11-17.

[34] - DIETRICH J. R.
Determination expérimentale de l'autorégulation et de la sécurité de fonctionnement des piles utilisant l'eau comme ralentisseur.
Rapports P. 481. Conférence Internationale Genève, 1955 (voir aussi Rapport P 851 de cette conférence).

[35] - NYER et alt. (Philips Petroleum Co)
Experimental investigations of reactor transients.
SPERT I, IDO 16 285, 1956.

[36] - NYER W. E. and MUFFMAN J. R.
Quartely technical report Spert project.
October-November-December 1959. IDO 16 616.

[37] - Hazards Report for Torrey pines TRIGA Reactor.
General Atomics. G. A 722.

[38] - THOMAS H. A.
Recent Developments in reactor instrumentations
General Atomics. G. A. 1693.

[39] - CORBEN H. C.
Power bursts in nuclear reactors.
RWC 22-127 (September 4, 1958).

[40] - HORNING W. A. and CORBEN H. C.
Theory of power transients in the Spert I reactor.
Part I (Janv. 1958), IDO - 16434.

[41] - FURET J. et WEILL J.
Transitoires de période liés à une variation de réactivité.
Rapport C. E. A. n° 1950.

[42] - SMETS H. B.
Reactor dynamics at low power.
Rapport P. 107. Conférence Internationale Genève, 1958.

[43] - FURET J.
Influence de l'empoisonnement xénon dans les piles à haut flux sur la vitesse des barres de contrôle.
Rapport C. E. A. à paraître.

[44] - GARCIA M. et FURET J.
Influence de l'empoisonnement xénon sur le contrôle et la sécurité des piles à haut flux.
Rapport 1402 / SAER / 928.

[45] - RAIEVSKI V.
Effets cinétiques du xénon et du samarium.
Génie Atomique, Chapitre B XI.

[46] - FURET J.
Destruction du xénon lié à une excursion de puissance de la pile EL 3.
Rapport DE. Gr.- Contrôle des réacteurs.

[47] - HUSTON N.E. and MILLER N.C.
Special safety devices.
Nucleonics, vol. 16, n° 5, 86-88.

[48] - SCHULTZ M.A.
Control of nuclear reactors and Power plants.
GLASSTONE S.
Principles of nuclear reactor engineering.

[49] - FURET J.
Note sur la sécurité de Rubéole II montée linéaire de réactivité correspondant à une vitesse de herse de 32 pcm/s et 10 pcm/s.
Rapport 1200 / DE / 049.

[50] - GREVER F.E. et PIGOTT J.H.
Calculations of required speeds of contrôl and safety rods.
K.A.P.L. - M - FEC - 3.

[51] - COURTOT G.
Etude analogique des accidents de réfrigération sur EL 3 pour un demi chargement.
Etude CPLA 4 - 2 - D. E. Groupe contrôle des réacteurs.

[52] - BETTEMBOURG D., BRASSEUR J., CAILLET C. et DEAT M.
Etude des incidents thermiques dans un barreau du réacteur G 2.
Rapport DE / 1092 / 025.

[53] - SPENCER J. and BURKETT
Nuclear accident survey.
Nuclear Power, 5, n° 84, 77-80, octobre 1960.

[54] - FURET J.
Les tendances nouvelles dans l'instrumentation de Sécurité des Piles.
note C. E. A. 341.

[55] - CREEN A. E. et PETHORPE, RISLEY U. K. A. E. A.
Aspects of safety assessment and principles for protective systems of zero energy reactors.
Symposium on Safety Control and Instrumentation of zero energy and sub-critical assemblies.

[56] - AILLERET
Communication au 3ème Congrès de la Société Française des Electriciens. PAU, 1961.

[57] - FURET J.
Les chaînes de sécurité des piles atomiques.
Rapport 1430 / SAER / 937. Groupe Sécurité Piles.

[58] - FURET J.
Instrumentation de Sécurité des Piles.
Revue Automatisme. Juin-juillet 1961.

[59] - Nuclear process instrumentation.
ORNL 2695 UC-37. Instruments.

[60] - WHITAKER R.N.
Reliability and maintenance in large electronic systems.
I.R.E. Transactions. Octobre 1959.

[61] - JACOBS I.M.
Transactions A.I.E.E., 1957, n° 76, part I., 670-673.

[62] - COMTE R. et LAUNOIS M.
Dispositif de sécurité pour chaîne de contrôle à impulsions.
Bournemouth, 28-30 juin 1961.

[63] - FRIEDLING G., ROGOZINSKI A. et WEILL J.
Mesure des courants continus faibles.
Génie Atomique, chapitre V.

[64] - NIXON C.R. and PEARSON A.
Logarithmic rate measurements at low reactor power levels.
AECL - 1004 - CREL 918.

[65] - GAMP J.
Etude de la réponse d'un amplificateur logarithmique à la variation de puissance neutronique.
Rapport n° 1453/SAER/950 - CPLA - 12 - 10.

[66] - FURET J.
Principe de l'algèbre de Boole et des méthodes de synthèses dérivées en vue de leur application aux automatismes destinés à la sécurité des piles atomiques.
Rapport C.E.A. 2005.

[67] - FURET J. et COQUARD A.
Chaînes de sécurité et verrouillages installés sur les piles du C.E.A.
Rapport 1511/SAER/971. Groupe Sécurité Piles.

[68] - WEILL J. et FURET J.
Sécurités et verrouillages des réacteurs nucléaires à neutrons thermiques.
Rapport intérieur D.E. Saclay.

[69] - FURET J.
Developpement des relais statiques dans le contrôle des réacteurs nucléaires.
Communication au Congrès MESUCORA, 1961.

[70] - FURET J.
Utilisation d'éléments statiques dans les chaînes de sécurité des piles atomiques.
Symposium on Safety Control and Instrumentation of zero energy and subcritical assemblies. Bournemouth. Winfrith. 28-30 juin 1961.

[71] - HUTCHEON I.C. and MARSON G.B.
Solid state electronic instrument for measurement and control.
Instrument Engineer, avril 1961.

[72] - RINGUET P.
Amplificateurs magnétiques.
Revue Générale de l'Electronique. Janvier-mars 1961.

[73] - ISA Journal. January 1960.

[74] - PIO E.
Les amplificateurs magnétiques.
Conférence S.F.E., décembre 1958.

[75] - QUENEE R.
Amplificateur de courant continu à transistors.
Rapport n° 1447/SAER/944. Groupe Sécurité Piles.

[76] - FURET J. et KAMIL S.
Chaine de sécurité du type statique à transistors.
Rapport n° 1414/SAER/932 - Groupe Sécurité Piles.

[77] - NAGY I.
A fast reponse magnetic amplifier.
Acta. Tech. Acad. Sci. Hungar, 1960, 29; 1/2, 183-234.

[78] - UNGER S.H.
Hazards and delays in asynchronous sequential switching circuits.
I-RE TRANS- U.S.A., 1959 - CT 6 - 1, 12-25.

[79] - CAMERON G.E.
The dynamics of relays.
Electronic Indust. U.S.A., 1959, 18, 9, 70-76.

[80] - LYTEL A.
Manipulation of symbolic logic expressions.
Instruments and Control Systems, U.S.A., 1960, 33, 7, 1141-1142.

[81] - Anonyme.
Design of static relays for signaling and Control Electronics.
July, 1960.

[82] - DE SAUTELS A.N.
The versatile Transistor nor circuit.
Control Engineering, Mai 1960.

[83] - LUECKE G.
Switching with transistors.
Electronic Indust. U.S.A., 1960, 19, 7, 82-87.

[84] - BLAKE R.F.
Designing solid state static power relays.
Electronics, U.S.A., 1960, 33, 32, 114-117.

[85] - Amplificateur statique de Sécurité ASS-61.
Notice 1438/SAER/940 - Groupe Sécurité Piles.

[86] - FURET J. et HUBER H.
Limiteur d'évolution du type statique.
Rapport 1512/SAER/972. Groupe Sécurité Piles.

[87] - FURET J.
Chaîne Sécurité magnétique Peggy.
Rapport 1384/SAER/920 - Groupe Sécurité Piles.

[88] - LIPINSKI W. C. et HARRER J. M.
Trends in nuclear reactor Control.
IRE Transactions on Nuclear Science. Décembre 1960.

[89] - SHEA R. F.
Applications of solid state devices to nuclear plant technology.
KAPL - M - RF S 1.

[90] - Anonyme.
Development of fast scram instrument for O. M. R. critical experiment.
NAA - SR - MEMO 2919.

[91] - ROCHE R.
Etude sur un appareil de sécurité rapide de niveau de puissance pour empilement critique.
Rapport n° 1509 / SAER / 969. Groupe Sécurité Piles.

[92] - FITCH H., HUSTON N. E. et MILLER N. C.
Integral safety devices for reactors.
Rapport P 1080. Conférence Internationale de Genève, 1958.

[93] - FURET J.
Etude d'un prototype de barre fusible destinée à la pile Rapsodie.
Rapport 1354 DE/SAER/910 - Groupe Sécurité Piles.

[94] - BREGAND G.
Dêpot de Brevet.

ANNEXE I

BIBLIOGRAPHIE NON REFERENCEE des CHAPITRES II et IV

CARBON M. W. and HOLZMANN E. G.
Preliminary hazards analysis of Wisconsin pool-type reactor
Report n° 14, NP 8 302 (U. S. A.)

PAXTON H. C., MARAMAN W. J. and BAKER R. D.
Los Alamos criticality accident
December 30, 1958, Nucleonics U. S. A., 1959, 17, 4, 107-108

Anonyme
Spert III helps safety studies
Atom-world. U. S. A., 1959, 10, 2, 58-59

PERSANO A.
Le problème de la sécurité des installations nucléaires
Energ. Nucl. Italie, 1958, 5, 11, 716-721

Anonyme
Rapport de sécurité sur la pile de recherche de Berlin B. E. R.
Institut für Kernferschung Berlin Wannsee, Oktober 1 958

STATHOPLOS A. and ZIMMERMAN E. L.
Pawling research reactor hazards summary report
Rapport NDA, 3 002-1 (U. S. A.)

PALLADINO N. J.
PWR fuel element failure detection system.
Rapport WAPD - PWR - RD 229 (U. S. A.)

EDLUND M. C. and NODERER L. C.
Analysis of Borax experiments
Rapport CF, 57, 7, 92 (U. S. A.)

WISNER S.
Possible hazard in H. R. T. start-up
Rapport CF, 54, 4, 81 (U. S. A.)

Anonyme
Army gas cooled reactor systems program. Preliminary
hazards summary report for the ML-1 Nuclear power plant
Rapport IDO, 28 537 (U. S. A.)

BALLIGAND P.
Incidents de fonctionnement à EL 2 et EL 3 entre le 1/1/1 957 et
le 1/7/1 959
Rapport intérieur SGPS

STONE R. S. and COLOMB A. L.
ORR start up accident and cooling flow coastdown analog analysis
Rapport C. F., 61, 1, 6 (U. S. A.)

HAUBENREICH P. N.
Events preceding the large power excursion on November 1 959
Rapport C. F., 60, 5, 18 (U. S. A.)

ROSEN S. S.
Hazards summary report for the army package power reactors SM 1
Rapport APAE (U. S. A.)

JENS W. H.
Summary of APDA fast reactor safety studies
Rapport ANL 5 719 (U. S. A.)

GARVEY J. E.
Start-up incident in 30 MW S. G. R.
Rapport NAA, SR, MEMO, 748 (U. S. A.)

Anonyme
Compléments au rapport de sécurité du reacteur de recherche B. E. R.
de Berlin.
Hahn, Meitner, Institut für Kernferschung, Berlin Wannsee 1 959

FORBES S. G. and BENTZEN F. L.
Analysis of self shut-down behavior in the Spert I Reactor
Rapport IDO 16 528 (U. S. A.)

MELAUGHLIN J. E.
Nuclear safety in manufacturing plants
United States Atomic Energy Commission, 1 959

Anonyme
Reator accident reconstructed
New. Scientist (G. B.) 1 960, 7, 170, 415

LANNING D. D.
Summary report of reactor hazards for the prototype physical constants testing reactor
Rapport H. W. 32 791 (U. S. A.)

NYER W. E. and FORBES S. G.
Spert program review (Phillips Petroleum Co Atomic Energy Div Idaho Fells)
Rapport IDO 16 634 (U. S. A.)

RATHBONE D. E. and NORMAN A. H.

Analysis of reactivity accidents and of change in load transients for the CVTR reactor
Rapport CVNA, 47 (U. S. A.)

ROSENTHAL Henry
PMZ 1 hazards summary report (U. S. A.)

Anonyme
Hazards report for torrey pines TRIGA REACTOR
Rapport GE, 722 (U. S. A.)

HUGHES E. O. and GREENWOOD J. W.
Contamination and clean up of N. R. U.
Nucleonics U. S. A., 1 960, 18, 1, 76-80

DICKINSON R. W.
Coolant block domages S. R. E. fuel
Nucleonics U. S. A., 1960, 18, 1, 107-111

Anonyme
Nuclear training reactor. Preliminary report and hazards analysis
Rapport A. E. C. U., 4 444 (U. S. A.)

PIGOTT S. H.
An approximate method for calculating reactor temperatures during complete loss of flow accidents
Rapport KAPL-M-JHP, 6 (U. S. A.)

JACOBSON J.
Preliminary safeguards report for the PIQUA organic moderated reactor
Rapport NAA, SR, MEMO, 4 048

Anonyme
Safeguards report for the Georgia. Tech Research Reactor
Rapport NP 8 350 (U. S. A.)

BROWN W. S. and HOLZMANN E. G.
Description and safeguard evaluation of Sanford pool reactor
Technical report n 4, NP 8 130 (U. S. A.)

Anonyme
Pool test reactor hazards evaluation final report
Rapport BAW 74 (U.S.A.)

CO BRIGHT and JE GRUND
Hazards summary report Spert II
Rapport IDO 16 491 (U.S.A.)

DAANE R.
Fast reactor accident dynamics American
American Society of Mechanical Engineers New-York n° 55 SA 74

Anonyme
Summary hazards report for North Caroline State College
reactor NCSCR 4
Rapport NP 7 041 (U.S.A.)

KUPP. R.W.
Preliminary hazards report to the atomic energy commission for
the Cornell University dual core reactor
Vitro Engineering Company rapport KLX 1 789 (U.S.A.)

KUHLMANN A. et KELLERMANN O.
L'examen technique de la sécurité lors de la construction
de réacteurs nucléaires
Atomwirtschaft, Dtsch., 1 960, 5, 4, 166-171

BEACH L.A., PIEPER A.G. and YOUNG M.P.
Progress report on fast breeder reactor safety studies
Rapport NRL - MEMO, 819 (U.S.A.)

BEACH L.A., PIEPER A.G. and YOUNG M.P.
Progress report on fast breeder reactor safety studies
Rapport NRL - MEMO, 975 (U.S.A.)

QUARLES L.R. and WALKER W.P.
A hazards summary of the proposed research and training reactor
School of Engineering University of Virginia (U.S.A.)

FREUND G.A., ELIAS P. and BOLAND J.F.
Design summary report on the transient reactor test facility Treat
Rapport ANL 6 034 (U.S.A.)

FISCHER D.L., KORNBLITH L. and Mc DANIEL D.
General electric Vallecitos boiling water reactor.
Final hazards summary report SG, VAL (U.S.A.)

KASTEN PR, ROSENTHAL M.W. and THOMAS D.G.
The utility of critical experiments in designing for reactor
safety in the HRE 3 program
Rapport CF, 58, 1, 52 (U.S.A.)

BEACH L.A., PIEPER A.G. and YOUNG M.P.
Progress report on fast breeder reactor safety studies
Rapport COO 240 (U.S.A.)

Anonyme
Reactor safety quartely progress report for february, april 1 954
North American aviation S R 1 062 (U.S.A.)

FITCH S. H. and HUSTON N. E.
Reactor safety quartely progress report
Rapport NAA, SR, 1 634 (U. S. A.)

MILLER N. C.
Reactor safety quartely progress report
Rapport NAA, SR, 2 157 (U. S. A.)

Anonyme
The status of the reactor safety program
Rapport NYD 4 720 (U. S. A.)

Anonyme
A report on the safety aspects of the homogeneous reactor experiment
Rapport ORNL 731 (U. S. A.)

BEALL S. E. and VISNER S.
Homogeneous reactor test summary report for the advisory committee on reactor safeguards
Rapport ORNL 1 834 (U. S. A.)

SWICKARD E. O.
Los Alamos molten plutonium reactor experiment hazard report
Rapport LA 2 327 (U. S. A.)

Anonyme
Hazards summary report for the army package power reactor S M 1
Rapport APAE 2 (U. S. A.)

Anonyme
PMZ 1 Hazards summary report
Rapport MND, M, 1 854 (U.S.A.)

Anonyme
Yankee critical experiments hazards summary report
YAEC 31 (U.S.A.)

Anonyme
Final summary safeguards report for the general electric test reactor
CEAP 2 064 (U.S.A.)

SCHROEDER F.
Quartely technical report spert project
Rapport IDO 16 616 (U.S.A.)

DICKERMAN C.E., SOWA E.S. and OKRENT D.
Fast reactor safety studies in Treat a status report
cleonics U.S.A. April 1 961

CARRE J.C. et VIDAL R.
Rapport sur la sûreté du réacteur minerve
SEC/F 60/21

SAUTIEZ, CHATOUX etc..
Réacteur d'enseignement "Ulysse"

AGERON A., AMARDEIL P. etc...
Rapport de sûreté préliminaire de la pile "Siloë"

CORDELLE M. et DELCROIX M. etc ...
Rapport préliminaire de sûreté de Melusine II

LIMONGI M.
Rapport de sûreté de la pile EL 3

DENIELOU G., DEROBIEN E. et ROSSILLON F. etc ...
Rapport de sûreté de Melusine

ANNEXE II

BIBLIOGRAPHIE NON REFERENCEE du CHAPITRE VIII

Anonyme
Magnetic core logical units for industrial control applications
Process, Control, Automat GB, 1 959, 6, 10, 428-432

J. W. BUTLER
New uses of static magnetic composents in protective circuits
Control Engng, U.S.A., 1 959, 6, 11, 135-138

FREEDMAN A. L.
Magnetic core matrices for logical functions
Electron Engng, G.B., 1 959, 31, 376, 358-361

GRANE H. D.
A high speed logic system using magnetic elements and connecting wire only
PROC, IRE, U.S.A., 1 959, 47, 1, 63-73

PARTCHOMENKO P. P.
Machine logique de forte capacité pour l'analyse des montages à relais
Izv, Akad, Naouk, SSSR 1 959, 3, 179-180

GUTTERMAN A.
Fast switching for industrial control Electronics U. S. A.
1 959, 32, 26, 51

SOOHOO R. F.
A Ferrite cutoff switch
Ire. Trans. U. S. A., 1 959, MTT; 7, 3, 332-336

GRINICH V. H. and HAAS I.
P. N. 11. N triode switching applications
Ire Trans. U. S. A. 1 959, EC 8, 2, 108-113

CONSTANS H.
Thyratron à cathode froide Z 71 U application à la commutation téléphonique
Electrons Indus. Fr., 1 959, 27, 169-170

SOUBIES . CAMY H.
Cricuits logiques à ferrites
Electron, Industr. Fr., 1 961, 44, 207-211

TOUTAIN G.
Equipement automatique de contrôle de réacteurs
Electron Automat. Fr., 1 961, 7, 31

SENKO M. E.
A control system for logical block diagnosis witch data loading
Communic. A. C. M. USA, 1 960, 3, 4, 236-240

Anonyme
Transistor switches for industrial service
Control Engng, U. S. A., 1 961, 8, 3, 103-126

ROUMEGOUS A.
Les relais statiques "Cypak" et leur emploi dans le contrôle industriel
Automation Fr., 1 960, 44, 135-140

Anonyme

Automation in the Soviet Union
Brit. Commun. Electron, 1 960, 7, 2, 124-125

CAMERON C. E.
The dynamics of relays
Electr. Indus. U. S. A., 1 959, 18, 9, 70-76

FREE F. T.
New performance gained with static relays. Allis. chalmers
Elect. Rev. U. S. A., 1 960, 25, 2, 22-25

BLAKE R. F.
Designing solid state static power relays
Electronics U. S. A., 1 960, 33, 22, 114-117

LUECKE G.
Switching with transistors
Electron, Indust. U.S.A., 1 960, 19, 7, 82-87

ZARLENG S.A.
Static switching techniques for machine-tool safety
Electronics U.S.A., 1 959, 32, 24, 57-59

Anonyme
Les transistors dans les circuits de commutation
Rad, Electron, Prof. Fr. 1 959, 284, 13 et 59

LAGADEC P.
Blocs fonctionnels logiques à transistors pour l'industrie
Electron. Automat. Fr., 1 960, 3, 121-127

MILLER R.H.
Simplified coincidence circuits using transistors and diodes
Rev. Sci. Int. Instr. U.S.A., 1 959, 30, 6, 395-398

VARPAKHOVSKII F.L. and R.A. LIPMAN
Contact less relay with transistors
Autom. Remate Contr. USSR, 1 958, 19, 11, 1 004-1 011

MAITRA K.K.
Stability of logical networks and its application to improvement of reliability
Dissert, Abstr. U.S.A., 1 960, 20, 12, 4 622

SCHUBERT E. J.
Matrix algebra of sequentiel logic matrix logic III
A. I. E. E. Trons 1 959, 78, 1, 1 074-1 079

MACKAY R. S.
Switching in bistable circuits
Ire Trans. Med. Electron U. S. A., 1 960, ME-Z, 2, 98-103

BOOTH A. D.
The diverse nature of switching
Control G. B. 1 960, 3, 24, 103-105

WIECHEC W. and KELLEY C. M.
Fast switching by domain walls in ferrites
J. appl. Phys. U. S. A., 1 960, suppl. 31, 5, 1 315-1325

BROWNLOW J. M., SHEVEL W. L. and GUTWIN O. A.
Ferrite films, new logic and storage devices
J. appl. Phys. U. S. A., 1 960, suppl. 31, 5, 1 215-1 225

GOTO E., MURATA K. and NAKAZAWA K.
Esaki diode high speed logical circuits
Ire Trans Electron, computers, 1 960, EC-9, 1, 25-29

MASHER D. P.
The design ol diode transistor NOR circuits, IRE trans
Electron Computers, 1 960, EC-9, 1, 15-24, U. S. A.

LYTEL A.
Manipulation of symbolic logic expressions
Instrum and control Syst. U. S. A., 1 960, 33, 7, 1 141-1 142

WRIGHT M. J.
A transistor switching circuit for power regulation applications
Electron Engng - G. B., 1 960, 32, 390, 484-487

SEUROT J. B.
Ensemble logique à transistors
Electron, Automat. Fr., 1 960, 5, 222-223

Anonyme
Design consideration for a germanium p-n-p-n switching
device with three contacts and a "Sandwich" structure Ire trans
Electron, Device U. S. A., 1 960, ED-7, 3, 132-137

SOUBIES CAMY H.
Les circuits logiques à diodes
Electron Industr. Fr., 1 960, 37, 283-286

PRICE C. H.
High current solid state switches
Electronics U. S. A., 1 960, 33, 38, 72-73

MOY L. L.
Reverse bias considerations for transistor switching circuits
Rapport Americain SCTM 1 30-59 (15)

FEINER A. and LOVELL C. A.
The ferreed a new switching device
Bell Syst. techn. Journal U. S. A., 1 960, 39, 1, 1-30

MAUPIN A. A.
An introduction to boolean algebra
Rapport américain, H. W. 53 504 C

WOLFF G.
Essai de schématique dans la logique des commutations
Automation Fr., 1 959, 38, 285-288

MOISIL Gr.
Sur l'application de la logique à trois valeurs à l'étude des circuits électriques à contacts, redresseurs, résistances
Rev. Math. pures, appl. Roum, 1 959, 4, 2, 123-183

VASILIEVA N. C. and PROKHOROV N. L.
Magnetic logical units for automatic control circuits Automat 1, Telemekh U. S. S. R., 1 959, 20, 12, 1 647-1 658

MULLER D. E.
Treatment of transition signals in electronic switching circuits by algebric methods.
IRE trans, electron, computers U. S. A., 1 959, EC-8, 3, 401

MAUPIN A. A.
What is static switching ?
Rapport americain H. W. 53 504

GOLDEY J. M.
PNPN Switches diodes and triodes, what they are and how they work
Control Engng U. S. A., 1 960, 3, 10, 101-104

TOMAINO M. F. and FLYNN G. J.
Relays and related devices
Electronics U. S. A., 1 960, 33, 40, 58-61

SCHULLER H. and GARTNER W. W.
Inductive elements for solid state circuits
Electronics U. S. A., 1 960, 33, 17, 60-62

WRAY W. J.
On design of resistance coupled transistor logic circuits
IRE trans. circuit theory U. S. A., 1 959, CT-6, 37, 304-310

DESAUTELS A. N.
Power switching with junction transistors control
Engng U. S. A., 1 959, 6, 11, 113, 117

JOHNSON D. W.
Automatic control with static switching circuits
Electronics U. S. A., 1 959, 32, 17, 98-101

ROBERTS D. H.
Solid-state relays and switches control
G. B., 1 960, 3, 23, 153-155

MOKRYTZKI B. and STUART R. A.
A magnetic-amplifier silicon transistor power supply for missile application
A. I. E. E. trons, 1 959, 78, 1, 835-843

Anonyme
Magnetic amplifier circuits. A classification of half -wave and full-wave non reversible and reversible self saturating circuits
A. I. E. E. trans, 1 959, 78, 1, 739-751

JOHANNESSEN P. R.
Analysis of magnetic amplifiers with diodes
AIEE trans, 1 959, 78, 1, 485-504

JOHANNESSEN P. R.
Analysis of magnetic amplifiers without diodes
AIEE trans, 1 959, 78, 1, 471-485

HORACE A. and DARLING E.
Magnetic amplifiers for instrumentation
I. S. A. journal U. S. A., 1 960, 7, 1, 58-68